

**NALCO CHEMICAL COMPANY**  
**Френк Н. Кеммер редактор**

# **Книга Налко о Воде**

*Второе издание*

**Часть 4**

## **СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОДЫ**

**Издательство McGraw-Hill Book Company**  
Нью-Йорк, Сант-Луис, Сан-Франциско, Окленд,  
Богота, Гамбург, Лондон, Мадрид, Мехико,  
Милан, Монреаль, Нью-Дели, Панама,  
Париж, Сан-Паулу, Сингапур,  
Сидней, Токио, Торонто

**Данные, использованные в настоящем издании,  
внесены в каталог Библиотеки Конгресса**

**Практическое руководство по воде компании Nalco**

Включая указатель

I. Вода - Практические руководства, инструкции и т.д.,

И.Кеммер, Френк Н. П. Nalco Chemical Company.

QD169.W3N34 1987            628.1'62        87-4171

ISBN 0-07-045872-3

Авторское право от 1988 1989 гг. принадлежит издательству McGraw-Hill. Все авторские права сохраняют силу. Опубликовано в Соединенных Штатах Америки. За исключением тех случаев, когда это разрешено Законом США об авторских правах, никакая часть этого издания не может быть воспроизведена, распространена в любом виде и любым способом, а также сохранена в базе данных или в системах восстановления служебной информации без письменного разрешения, предварительно полученного от издательства.

90 DOC/DOC 987

ISBN 0 - 07 - 045872-3

**Эта книга напечатана на бумаге, не содержащей кислоты.**

Редакторами этой книги также были Гарольд Б. Крофорд и Рита Т. Марголиез; контроль за ходом издательских работ Ричард А. Аусберн. Шрифт Times Roman - University Graphics, Inc.

Печать и переплет - компания R.R Donnelley & Sons Company.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЧАСТЬ 4 СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

38. ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ .....	833
39. ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ .....	865
40. ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД .....	937
41. МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ .....	959
42. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ .....	983
43. ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ .....	993
44. ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ВЫСШЕЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ .....	1019
45. СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ .....	1031
46. ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ .....	1051
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	1099
СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ .....	1103



Ч • А • С • Т • Ь • 4

---

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ  
ВОДЫ**



---

## ГЛАВА 38

---

# ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

---

Вода, используемая в промышленности, в основном применяется для охлаждения процессов и производимой продукции. Наличие воды в большинстве промышленных районов наряду с ее высокой теплоемкостью сделало воду наиболее предпочтительным теплоносителем как в промышленности, так и в коммунальном хозяйстве. В настоящее время в районах с малым количеством осадков все более широкое распространение получают технологии непосредственного охлаждения воздухом, однако, та степень, в которой используются эти технологии, все еще несопоставима как с точки со степени использования воды во всех областях применения, включая системы теплопередачи.

В последние годы проблема использования воды для охлаждения постоянно находилась под пристальным вниманием, как точки зрения необходимости борьбы с загрязнением окружающей среды, так и с точки зрения возможного энергосбережения, поэтому схемы использования охлаждающей воды постоянно менялись и продолжают изменяться. Например, многие системы предусматривают лишь однократный пропуск охлаждающей воды через промышленную систему, возвращая ее обратно в водные бассейны. Это создает опасность забора воды в больших количествах, а также повышения температуры воды в водоприемнике. С другой стороны, градирни допускают многократное использование воды, в результате чего в наиболее современных системах охлаждения испарением объемы водозабора снижаются более чем на 90% по сравнению с системами прямоточного охлаждения. Такой подход существенно снижает температуру воды водоприемника, но не температуру окружающей среды, поскольку тепло выделяется в атмосферу.

Эти изменения в конструкции и работе систем водяного охлаждения оказывают большое влияние на химию воды, так как это, в свою очередь, влияет на решение проблем коррозии, наличия осадка и возможного загрязнения системы. В этой главе рассмотрены промышленные системы, в которых вода используется для целей охлаждения, анализируются проблемы коррозии, осаждения и загрязнения этих систем, а также то, какое влияние эти проблемы оказывают на производственный процесс из-за потерь тепла при теплопередаче или отказа оборудования, или вследствие этих двух факторов вместе взятых. Кроме того, исследованы различные концепции подготовки охлаждающей воды, и методы контроля, необходимого для их успешной реализации.

---

### ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

---

Под теплопередачей понимают простую передачу тепла от одного тела к другому, более горячее из которых представляет собой источник тепла, а более холодное - его получатель. В системах водяного охлаждения к источникам тепла следует относить охлаждаемый продукт или процесс, а к получателем тепла - охлаждающую воду.

Охлаждающая вода, как правило, не имеет непосредственного контакта с источником тепла; как источник, так и получатель тепла обычно представляют собой жидкие среды, отделенные друг от друга барьером из материала, являю-

щегося хорошим проводником тепла, обычно металла. Барьер, позволяющий теплоте передаваться от источника к получателю, называется теплопередающей поверхностью, а сборка из нескольких тепловых барьеров, заключенных в корпус аппарата - теплообменником.

Во многих промышленных теплообменниках как источник, так и получатель тепла представляют собой жидкие среды. Если источником тепла является водяной пар или другой продуктовый пар, переходящий в жидкую фазу, такой теплообменник называется конденсатором; если получатель тепла представляет собой жидкость, переходящую в паровую фазу, такой теплообменник называется испарителем.

Теплообменник наиболее простой конструкции состоит из трубы или прохода концентрической конфигурации, расположенных внутри другой трубы - обечайки. Такая конструкция теплообменника получила название "труба в трубе". (Рис. 38.1). В этой простой конструкции теплообменника, технологическая жидкая среда протекает по внутренней трубке, а охлаждающая вода находится в пространстве между трубами. Тепло передается через металлические стенки, разделяющие эти жидкие среды. Поскольку обе жидкие среды проходят через теплообменник только один раз, то такая конструкция называется одноходовым теплообменником.

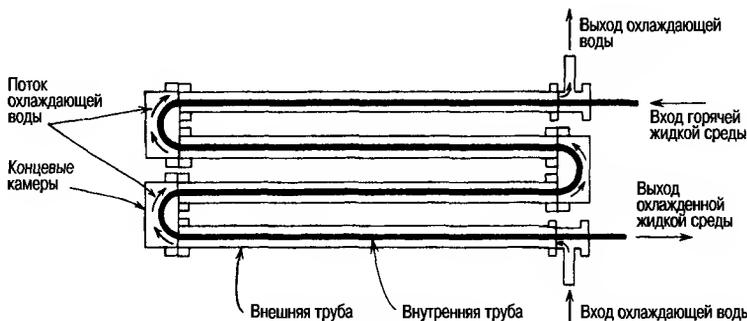


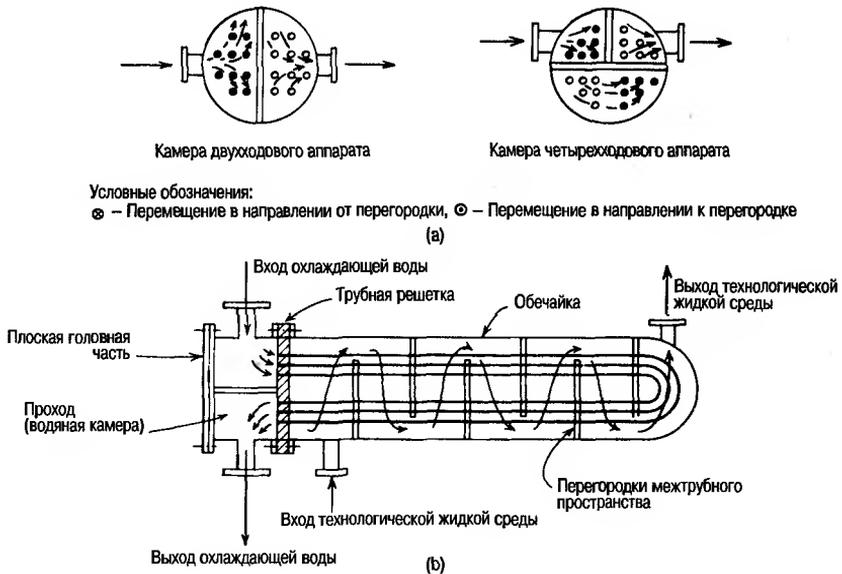
Рис. 38.1 Теплообменник типа "труба в трубе". Для обеспечения необходимого коэффициента теплопередачи теплообменники такой конструкции могут быть собраны из нескольких обычных модулей.

Если обе жидкие среды протекают в одном и том же направлении, такой теплообменник называется прямоточным; если же они протекают в противоположных направлениях, такой теплообменник называется противоточным теплообменником.

Для повышения кпд процесса теплообмена эта простая конструкция теплообменника была усовершенствована с включением в нее более сложных блоков. На рис. 38.2 показана конструкция кожухотрубного теплообменника. Технологическая жидкая среда и охлаждающая вода могут находиться с любой стороны барьера.

Другая простая конструкция теплообменного аппарата представляет собой сосуд с рубашкой. В этом варианте охлаждающая вода протекает в пространстве между двойными стенками сосуда, в котором идет химическая реакция, что сопровождается удалением теплоты технологического процесса. Эта конструкция напоминает конструкцию термоса, однако, в этом случае двойная стенка используется для отвода тепла, а не для изоляции. Пластинчатые теплообменники, некоторым образом напоминающие рамные фильтр-прессы, из-за своей компактной конструкции и возможности изготовления из материалов различных марок, нашли широкое применение в химической промышленности.

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ



**Рис. 38.2** Упрощенная деталь кожухотрубного теплообменника. Водяная камера может быть рассчитана, максимум, на 8 проходов, а для повышения кпд теплопередачи в межтрубном пространстве могут быть использованы перегородки разнообразных конфигураций: (а) Несколько вариантов конструкции водяной камеры для охлаждения трубного пространства; (б) Сборка простого двухходового теплообменника с U-образными трубами:

### Удаление излишней теплоты

Как только вода выполнит свою работу по охлаждению определенного источника тепла, к ней перейдет тепло, которое должно быть рассеяно. Это достигается путем передачи тепла в окружающую среду. В прямоточных системах из водного источника забирается прохладная вода, которая нагревается в процессе охлаждения определенного источника тепла, а затем возвращается в приемный поток, температура воды в котором повышается. В системах такого типа при выделении из охлаждаемого источника тепла в объеме 1 БТЕ (Британская тепловая единица) (0.252 кал), каждый фунт (0.454 кг) охлаждающей воды нагревается на 1 °F (0.56°С).

В открытых системах оборотного водоснабжения происходит испарение воды. При переходе из жидкой фазы в газообразную в окружающую среду вместо потока жидкой среды выделяется тепло. В ходе испарения воды имеет место рассеивание примерно 1000 БТЕ на фунт (555 кал/кг) воды, преобразованной в пар. При использовании испарения в процессе охлаждения, в окружающую среду может быть выделено в 50 - 100 раз больше тепла на единицу массы воды, по сравнению с испарительными системами. (Более подробное описание см. в нижеследующих разделах этой главы.)

### Наиболее распространенные способы передачи тепла

Известны два наиболее распространенных способа передачи тепла технологической жидкой средой охлаждающей воде в процессе теплообмена: теплопроводность и конвекция. Под теплопроводностью понимают передачу теплоты горячей жидкой среды через поверхность теплопередачи на другую сторону ба-

рьера. В этом случае тепло этой горячей поверхности передается охлаждающей воде при непосредственном контакте с ней, то есть вследствие ее теплопроводности. Впоследствии в процессе передачи тепла эта нагретая вода смешивается с охлаждающей водой, что получило название конвекции.

При управлении теплопроводностью необходимо учитывать пять основных факторов:

1. Теплопроводные характеристики (теплопроводность) барьера.
2. Толщину барьера, через который передается тепло.
3. Площадь поверхности барьера.
4. Разность температур источника тепла и охлаждающей воды (наиболее важный фактор).
5. Отложения с обеих сторон барьера, обладающие изолирующими свойствами.

Из этих пяти факторов первые три обусловлены особенностями конструкции теплообменника; 4 и 5 - это рабочие параметры, которые изменяются в зависимости от условий эксплуатации. Отложения, образовавшиеся с обеих сторон металлического барьера, имеют более низкую теплопроводность по сравнению с теплопроводностью самого металла, следовательно, скорость теплопроводности зависит от наличия любых отложений. Например, образование отложений карбоната кальция толщиной 0.1 дюйма (0.25 см) на стенке трубы теплообменника может привести к снижению скорости теплопередачи на целых 40%.

Такое снижение скорости теплопередачи может означать, что охлаждающая вода не в состоянии удалить тепло технологического процесса в требуемом объеме. Поэтому, для поддержания скорости охлаждения в тех пределах, которые имели место до образования отложений, необходимо либо замедлить производство, либо увеличить расход охлаждающей воды. В большинстве случаев последнее осуществить нереально, в результате чего снижается производительность конкретного технологического блока или всей установки.

### Конструкция теплообменника

В теплообменнике простой конструкции, о которой было сказано выше (Рис. 38.1), обе жидкие среды пропускают через теплообменник только один раз, поэтому такой теплообменник получил название одноходового. Конструкция теплообменников, работающих по противоточной схеме, когда жидкая среда-получатель тепла и жидкая среда-источник тепла текут в противоположенных направлениях, является более совершенной по сравнению с конструкцией одноходового теплообменника, поскольку такая конструкция обеспечивает большую движущую силу (измеряемую как средняя разность температур) при тех же конечных температурах; следовательно, можно передать тоже самое количество тепла при меньшей площади поверхности. Таким образом, противоточные кожухотрубные теплообменники обычно находят большее применение, поскольку при конкретных заданных условиях может быть передано большее количество тепла.

Основной недостаток теплообменника типа "труба в трубе" заключается в относительно небольшой поверхности теплообмена, обеспечиваемой одной трубой теплообменника, по сравнению с общим пространством, которое требуется для всей установки. Для преодоления этого недостатка в современных теплообменниках площадь эффективной теплопередачи увеличивается за счет использования нескольких труб в обечайке. Это способствует большему контакту между источником и приемником тепла. Кроме этого, большинство промышленных теплообменников являются многоходовыми. Оба этих метода направлены на сочетание эффективной теплопередачи с практически целесообразными размерами оборудования. На рис. 38.2 показан теплообменник типа "труба

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

в трубе" с двумя трубами в одном кожухе. Почти во всех таких теплообменниках вода протекает по трубам, а технологическая жидкая среда находится за их пределами - в межтрубном пространстве. Однако, имеется ряд исключений, и, следовательно, любое исследование эксплуатационных показателей теплообменника должно начинаться с определения того, какая среда находится в трубном, а какая - в межтрубном пространстве. Для удобства, в настоящем издании внимание концентрируется на традиционном варианте нахождения жидких сред, когда охлаждающая вода протекает в трубном, а технологическая жидкая среда - в межтрубном пространстве обечайки теплообменника.

При расчете конструкции теплообменников, инженер получает из справочной литературы значения коэффициентов теплопередачи в БТЕ в час на квадратный фут поверхности, на дюйм толщины барьера, на градус разности температур, или  $U_1 = \text{БТЕ/ч/кв. фут/дюйм/}^\circ\text{F}$  (кал/ч/м<sup>2</sup>/см/°С). Для заданного размера труб теплообменника, которые могут быть стандартизированы для определенных конструкций, например, конденсоров, скорость теплопередачи может быть рассчитана по следующей сокращенной формуле, поскольку толщина стенки трубы известна:

$$U_2 = \text{БТЕ/ч/кв. фут/}^\circ\text{F} \\ = (\text{кал/ч/м}^2/^\circ\text{C})$$

Если известны температурные условия процесса, то эту формулу можно упростить:

$$U_3 = \text{БТЕ/ч/кв. фут} \\ = (\text{кал/ч/м}^2)$$

И, наконец, конструкция конкретного теплообменника, используемого в определенной области применения с незначительными изменениями температурных условий, может быть рассчитана по суммарной теплопередаче в БТЕ/ч (кал/ч). Если поток тепла в БТЕ/ч уменьшается, то необходимо провести исследование для определения того, является ли это результатом изменения температурных условий, наличия отложений, забивки труб или какой-либо иной причины. Такие проблемы могут иметь место как на стороне воды, так и на стороне технологической жидкой среды.

В большинстве технологических теплообменников тепловой поток составляет в среднем от 5000 до 6000 БТЕ/ч/кв. фут (от 120 до 150 кал/ч/м<sup>2</sup>). Однако, в некоторых теплообменниках он превышает 30000 БТЕ/ч/кв. фут (750 кал/ч/м<sup>2</sup>) при конденсации пара на стороне технологического процесса. Скорость теплопередачи значительно изменяется так же и в зависимости от скорости потока воды (см. рис. 38.3).

Температура охлаждающей воды в поперечном сечении трубы не является одинаковой: самая горячая та вода, которая находится в непосредственном контакте со стенкой трубы. Температура стенки трубы, получившая название поверхностной температуры, представляет собой важный показатель при разработке программ химической водоподготовки. Фактически, поверхностная температура - наиболее важная переменная для борьбы с коррозией и отложениями. Поверхностную температуру можно рассчитать, исходя из скорости потока воды, теплового потока, а также температур воды и технологической жидкой среды. Например, при очень высоких поверхностных температурах (превышающих 200 °F (93 °C)), на установке существует большая вероятность появления накипи и коррозии. Многие соединения, найденные в образованных отложениях, в условиях повышенных температур менее растворимы в воде, в то время как коррозионные реакции протекают гораздо быстрее.

Охлаждающая вода может протекать как в трубном пространстве (внутри трубок), так и в межтрубном пространстве (вокруг трубок) теплообменника. С точки зрения необходимости очистки воды, лучше, если вода находится в трубном пространстве. Во избежание осаждения твердых взвешенных частиц



**Рис. 38.3** Изменение коэффициентов теплопередачи в зависимости от скорости, как в межтрубном, так и в трубном пространстве. Однородная скорость в межтрубном пространстве не может быть достигнута из-за ограничений в геометрии теплообменника.

на стенках труб в теплообменниках такой конструкции, скорость потока воды обычно поддерживается на уровне 2 - 3 футов/с (от 0.6 до 0.9 м/с) и даже 7 - 8 футов/с (от 2.1 до 2.4 м/с). Более низкие скорости способствуют осаждению на стенки труб взвешенных твердых частиц и появлению отложений. В пучке труб низкая скорость, скорее всего, может иметь место только в одной трубе вследствие ее забивки или недостаточно равномерного распределения потока воды.

Иногда, при высоком давлении на стороне технологического процесса экономически более целесообразной считается конструкция теплообменника, в котором охлаждающая вода протекает в межтрубном пространстве. Одна из главных проблем таких теплообменников заключается в снижении скорости потока в области перегородок, трубных опор и трубных решеток в то время, как средняя скорость потока воды в межтрубном пространстве является приемлемой. Эти зоны с низкой скоростью потока воды оказывают влияние на поверхностную температуру и резко увеличивает риск появления отложений и быстрого ухудшения качества металла. Например, известно, что теплообменники из углеродистой стали, вода в которых находилась в межтрубном пространстве, выходили из строя в течение 3 месяцев из-за пробоев в трубах, даже в присутствии такого сильного ингибитора коррозии как хромат.

## **СИСТЕМЫ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ: ПРОБЛЕМЫ И ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**

Типичные проблемы, присущие любым системам охлаждающей воды и имеющие место на стороне воды, перечислены ниже:

**Коррозия** – это функциональная зависимость характеристик воды и металла в системе. Коррозия способствует преждевременному ухудшению качества металла; отложения продуктов коррозии снижают как теплопередачу, так и скорость потока.

**Накипь** вызвана осаждением соединений, например, углекислого кальция, которые становятся нерастворимыми при более высоких температурах. Накипь оказывает негативное влияние на теплопередачу и уменьшает скорость потока.

**Обрастание** имеет место при выпадении в осадок взвешенных твердых веществ, появлении продуктов коррозии и росте микробной массы. Обрастание оказывает на систему такое же негативное влияние, что и накипь и, кроме того,

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

обрастание также способствует возникновению подшламовой коррозии.

При обработке охлаждающей воды необходимо руководствоваться теми же самыми основными принципами, характерными для всех типов систем охлаждающей воды. Прежде всего, необходимо должным образом идентифицировать проблему: накипь, коррозия, обрастание или комбинация любых из этих факторов. На последующих этапах следует выполнить тщательный анализ жидких сред на стороне воды и технологического процесса. В ходе этого анализа будут выявлены особенности конструкции системы, эксплуатационные показатели, химия, т.е. важные факторы для выбора и применения на практике надежной, экономичной обоснованной программы химической водоподготовки. Особое внимание следует уделять системам с особыми требованиями к водоподготовке; в частности тем системам, в которых существует потенциальная опасность загрязнения воды технологической жидкой средой или продуктом, в результате чего наиболее эффективный способ обработки не является приемлемым. Известны три основных типа систем водяного охлаждения: прямоточная, замкнутая рециркуляционная (без испарения), и открытая рециркуляционная (с испарением).

### Прямоточное охлаждение

При прямоточном охлаждении вода забирается непосредственно из системы водоснабжения предприятия, затем пропускается через систему охлаждения и возвращается в водоприемник. Таким образом, источник теряет свое тепло. Главная особенность прямоточных систем заключается в расходе относительно большого объема воды на охлаждение. Обычная схема прямоточной системы охлаждения водой показана на рис. 38.4. В некоторых системах прямоточного охлаждения вода из системы водоснабжения предприятия используется и как питьевая и для нужд охлаждения, следовательно, необходимо предусмотреть химические вещества, являющиеся безопасными для питьевой воды.

Типичная программа химической водоподготовки, проводимая в целях борьбы с коррозией, может предусматривать использование различных неорганических фосфатов, как в чистом виде, так и в соединении с цинком. При применении указанных соединений в небольших концентрациях, требуемых лишь для экономически эффективной обработки систем прямоточного охлаждения, эти соединения не образуют никакой видимой пленки на поверхности металла; однако, их добавление приводит к уменьшению скорости коррозии примерно на 90% по сравнению с теми системами, обработка которых не проводилась. Таким образом, эти соединения обеспечивают защиту от коррозии, поскольку химическое вещество, действуя в местах возможной потери металла, препятствует коррозионной реакции и, следовательно, уменьшает количество металла, удаляемого с поверхности.

В тех системах, где проблему представляет накипь, наиболее часто причина заключается в наличии углекислого кальция вследствие изменения индекса устойчивости воды.

В системах питьевой воды для борьбы с накипью обычно используются полифосфаты.

В системах технической воды более эффективными ингибиторами для борьбы с накипобразованием являются соли фосфиновой кислоты, некоторые акрилатные полимеры или сочетание соли фосфиновой кислоты/акрилатов. Существуют два способа удаления накипи углекислого кальция с теплопередающих поверхностей и из распределительных труб при помощи этих ингибиторов:

1. Эти ингибиторы взаимодействуют с ионами, обладающими потенциалом накипобразования, и, тем самым, предотвращают рост кристаллов. Для этой цели обычно используются неорганические полифосфаты как в отдельности, так и в сочетании друг с другом (окончательная подготовка). Иногда

для корректировки индекса устойчивости воды используется кислота, которая, одновременно, предотвращает осаждение  $\text{CaCO}_3$ . Что касается накипи, образованной в результате осаждения марганца и железа, то в этих случаях использование кислоты неэффективно. Использование кислоты представляет собой наиболее экономически эффективный метод обработки крупномасштабных проточных систем охлаждения в целях предотвращения осаждения  $\text{CaCO}_3$ .

2. Эти ингибиторы создают такие условия, при которых прекращается рост ядер кристаллов на теплопередающих поверхностях и линиях передачи. В этом процессе модификации кристаллов используются различные полимеры и различные соединения фосфата - как органические, так и неорганические - а иногда и природные органические соединения.

Обрастание, осаждение твердых примесей, железа, марганца или микробных масс, представляет собой сложный механизм, контролировать который можно, владея такими переменными, как размер и заряд частиц, скорость пото-

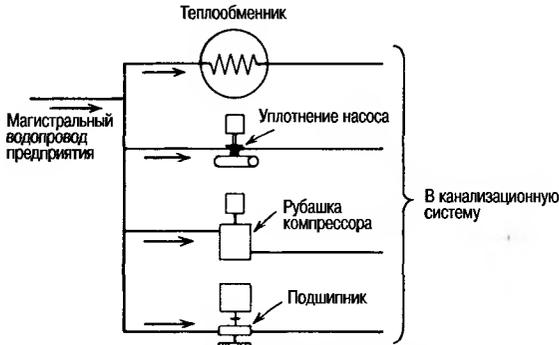


Рис. 38.4 Типичная схема системы прямооточного охлаждения на небольшом промышленном предприятии.

ка воды, состав, температура и бактериальная флора.

Один подход к решению этой проблемы состоит в том, чтобы обеспечить соответствующую обработку веществ, ухудшающих качество воды, например, железа и марганца, посредством непрерывного добавления определенных полимеров с тем, чтобы легко удалить эти загрязняющие вещества из системы. Успех этого подхода зависит от соблюдения требуемых скоростей воды повсюду в системе. Области с низкими скоростями потока воды, например, межтрубное пространство теплообменников, рубашки реакторов и компрессоров, вероятнее всего, станут местами скопления осадка и их защита будет затруднена.

Второй подход предполагает дисперсию взвешенных твердых веществ в очень маленькие частицы, и, таким образом, предотвращение их агломерации в достаточно крупные частицы, которые могли бы выпасть в осадок. Такие мелкие частицы могут быть значительно легче выведены из системы. Для этой цели наиболее часто применяют поверхностно-активные вещества и низкомолекулярные полимеры. Выбор наиболее оптимального диспергирующего агента зависит от проблемы, которую необходимо решить. Для оптимизации действия какого-либо диспергирующего агента в борьбе с конкретным загрязняющим веществом, ухудшающим качество воды, полимеры могут быть изготовлены на заказ. Это особенно актуально для железа и марганца.

Большинство проблем загрязнения во всех типах систем охлаждения услож-

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

нено микробным действием. Осаждение шлама в трубах не только сказывается на эффективности теплопередачи, но и действует как ловушка, которая улавливает взвешенные вещества, далее препятствуя теплопередаче. Кроме того, побочные продукты бактериального обмена веществ влияют на химию воды, включая тенденцию к образованию накипи или коррозии металлов. Надлежащее использование биоцидов и биологических диспергирующих агентов может представлять собой правильное решение проблемы загрязнения проточных систем.

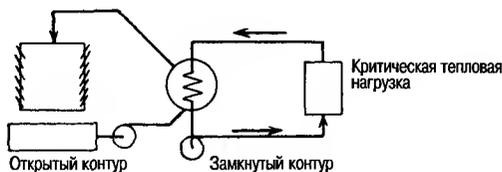
Редко когда коррозия, накипеобразование или обрастание системы происходят независимо друг от друга. Обычно два или все три процесса развиваются вместе, что вызывает потери теплопередачи и преждевременную порчу металла. Например, микробные организмы могут стимулировать возникновение накипи и коррозии; коррозия может способствовать увеличению содержания железа в воде и вызывать еще более интенсивную коррозию. Чтобы разорвать этот замкнутый круг, прежде всего необходимо должным образом идентифицировать проблему, и найти практичное и экономически эффективное ее решение.

### Замкнутые системы оборотного водоснабжения

Замкнутая система оборотного водоснабжения (замкнутая рециркуляционная система) - это система, в которой вода циркулирует в замкнутом контуре, с незначительным испарением, выпуском в атмосферу или каким-либо другим влиянием извне на химию воды в системе. Эти системы обычно требуют высокой степени химической обработки воды, и, поскольку потери воды в системе незначительны, такая степень является экономически оправданной. Для наиболее оптимальной работы системы обычно используют подпиточную воду высокого качества. Такие системы часто используются для наиболее критических областей применения, например, на установках для непрерывного литья в сталелитейной промышленности, где даже незначительные осаднения любого происхождения могли бы привести к неисправности оборудования.

На рис. 38.5 показана упрощенная схема замкнутой рециркуляционной системы. Тепло передается в замкнутый контур охлаждающей воды типичным теплообменным оборудованием и удаляется из замкнутого контура системы, за счет второго обмена теплом из замкнутого контура, во вторичный контур охлаждающей воды. Во вторичном контуре охлаждения обычно используется либо испарительное, либо проточное водяное охлаждение, либо воздушное охлаждение.

Скорость воды в замкнутых системах - обычно составляет от 3 до 5 футов/с (от 0.9 до 1.5 м/с). Повышение температуры в среднем составляет от 10 до 15°F (от 6 до 9°C), хотя в некоторых системах может значительно превышать эти пределы. Вообще в замкнутых системах подпиточная вода либо не требуется вообще, либо требуется в очень незначительном количестве для компенсации утечек через уплотнения насосов, переливов из расширительных баков и поверхност-



**Рис. 38.5** В наиболее критических областях применения теплопередачи, вода в замкнутом контуре используется для химического контроля в целях предотвращения отказа оборудования, и охлаждение такой воды происходит в открытом контуре:

ного испарения воды из выпускных отверстий системы. Такая периодическая подпитка требует проведения регулярных анализов для контроля за правильной концентрацией химикатов, применяемых для химической обработки.

Замкнутые системы обычно содержат различные металлы, что создает возможность возникновения электрохимической коррозии. Возможность коррозии под действием растворенного в воде кислорода в замкнутых системах, как правило, небольшая вследствие незначительного количества требуемой подпиточной воды - главного источника кислорода. Однако, в системах, для которых подпиточная вода по причине утечек требуется в больших количествах, кислород непрерывно появляется, и коррозия под его действием представляет серьезную проблему. Наличие кислорода может вызывать сильную питтинговую коррозию при повышенных температурах или в местах наиболее интенсивной теплопередачи.

Поскольку для замкнутых рециркуляционных систем требуется очень незначительное количество подпиточной воды, то целесообразно и желательно, чтобы в таких системах не было коррозии. Обычно это достигается путем применения хроматов, ингибиторов на основе нитритов/нитратов или путем обработки, например, сульфированным маслом в довольно высоких концентрациях.

Теоретически, в замкнутой системе образование накипи не должно представлять большую проблему, так как вода не уменьшается в объеме за счет испарения. В полностью замкнутой системе, ни одно из известных веществ, образующих накипь, не осаждается на металлических поверхностях, чтобы препятствовать теплопередаче или способствовать коррозии.

Однако если подпиточная вода требуется в больших объемах, то с каждой такой подпиткой образуется дополнительная накипь, и через некоторое время, проблема накипобразования может принять совсем другие масштабы. Кроме того, в местах с низкой скоростью потока воды, существует возможность появления осадка, ржавчины и взвешенных веществ, которые осаждаются на теплообменных поверхностях с образованием твердых отложений. Поэтому, при обработке замкнутых систем, для которых характерна частая подпитка водой, обычно применяют ингибиторы накипобразования и диспергирующие агенты. В зависимости от характерных особенностей обрабатываемой замкнутой системы, для ее подпитки часто используют смягченную воду или конденсат.

Так как вода, циркулирующая в замкнутом контуре, не подвергается воздействию окружающей среды, то ее загрязнение илом, возникающим под действием воздуха, или песком, маловероятно. Однако в таких системах может иметь место загрязнение воды микробными массами при высокой частоте подпитки или при утечках технологической жидкой среды, способствующих росту бактерий. Обработка таких систем проводится биологическими средствами, совместимыми с применяемыми химическими веществами, а также путем создания соответствующих условий эксплуатации замкнутых систем.

Если подпитка замкнутых систем проводится часто, то при проведении текущей обработки системы, желательно осуществить промывку замкнутых контуров водой с высокой скоростью потока и под высоким давлением для удаления скопившегося мусора.

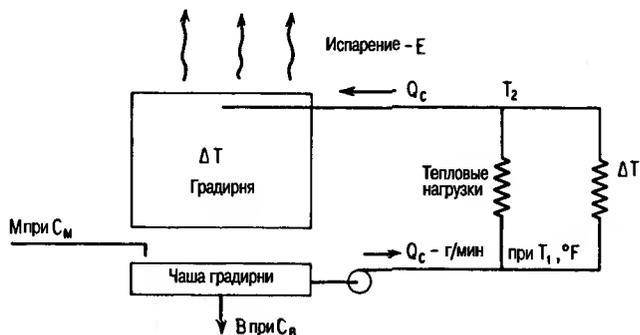
### **Открытые системы оборотного водоснабжения**

Открытая система оборотного водоснабжения (открытая рециркуляционная система) включает градирню или испарительный бассейн для рассивания теплоты, которую вода удаляет из процесса или продукта. Открытая рециркуляционная система (рис. 38.6) предусматривает забор воды из чаши градирни или камеры охлажденной воды, ее пропуск через технологическое оборудование, требующее охлаждения, и затем возврат воды через испаритель, где испаряемая вода используется для охлаждения оставшейся воды. Этот процесс повторяется снова и снова и при повторном использовании для компенсации потерь воды

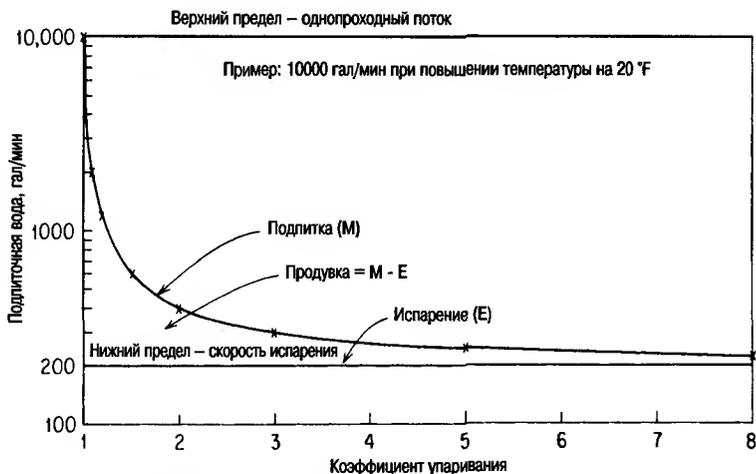
## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

при испарении и продувке системы при проведении текущего контроля за химическим составом оборотной воды необходим забор значительного количества свежей подпиточной воды. Как показано на рис. 38.7, в таких системах резко сокращается объем необходимой воды (например, забираемой из реки) и объем сбрасываемой воды.

Чтобы объяснить работу испарительной системы и позволить оператору рассчитать эксплуатационные показатели обычно используются следующие оп-



**Рис. 38.6** Система испарительного охлаждения с использованием градирни. Показан баланс воды и твердых веществ:



**Рис. 38.7** Уменьшение объема подпиточной воды в зависимости от концентрации в системах испарительного охлаждения:

ределения. Разъяснить эти определения поможет схема на рис. 38.6.

1. Скорость рециркуляции (расход) воды в системе ( $Q_c$ ): Это - поток охлаждающей воды, которую при помощи насосов прокачивают через весь контур охлаждения предприятия, обычно для охлаждения ряда теплообменников.  $Q_c$ , как правило, рассчитывается на основе данных заводской таблички рециркуляционного насоса; однако, измерения, выполненные в натуре, более

точны. Фактически, скорость воды, циркулирующей в замкнутой системе, редко превышает показатели, указанные в заводской табличке насоса, и обычно бывает на 10 - 20% меньше. Рабочая характеристика насоса, предоставляемая фирмой - изготовителем, показывает отношение скорости циркуляции воды к напору; манометр на выходе насоса должен обеспечить достаточно точную оценку скорости потока.

2. **Разность температур или температурные пределы ( $\Delta T$ ):** Этот термин относится к разности между средней температурой воды, возвращающейся в градирню из теплообменников завода ( $T_2$ ), и средней температурой воды после испарения ( $T_1$ ) (чаща градирни).
3. **Испарение ( $E$ ):**  $E$  представляет собой воду, перешедшую в атмосферу в процессе охлаждения (галлоны в минуту ( $m^3/мин$ )). Скорость испарения зависит от количества охлаждаемой воды ( $Q_c$ ) и разности температур  $\Delta T$ . Согласно эмпирическому правилу, в процессе испарения при каждом понижении температуры на  $10^\circ F$  ( $5.6^\circ C$ ), испаряется 1% от расхода воды в замкнутой рециркуляционной системе ( $Q_c$ ). Поэтому, при  $\Delta T = 20^\circ F$  ( $11.2^\circ C$ ) при протекании воды через градирню имеют место потери от испарения в размере 2% от расхода воды в замкнутой рециркуляционной системе ( $0.02 Q_c = E$ ).

$$E = Q_c \times \frac{(T_2 - T_1)}{1000}$$

$$E = Q_c \times \frac{(T_2 - T_1)}{560} \quad (\text{в метрических единицах})$$

Объем испарения, который может иметь место на конкретной градирне, ограничен, прежде всего, относительной влажностью воздуха. Относительная влажность определяется путем измерения температуры воздуха по влажному и сухому термометру. В районах с высокой влажностью воздуха, например, на побережье Мексиканского залива США,  $E$  может быть совсем незначительным, например, 0.75 % при  $\Delta T = 10^\circ F$ . И, наоборот,  $E$  может быть очень высоким, например 1.2 % при  $\Delta T = 10^\circ F$  в областях с очень низкой влажностью, как, например, в засушливых районах юго-запада Соединенных Штатов. В меньшей степени  $E$  зависит от отношения расхода "жидкость-газ", и от потерь тепла в других частях системы охлаждения.

4. **Подпиточная вода ( $M$ ):** Количество воды, требуемое для компенсации воды, потерянной при испарении, воды, израсходованной при продувке, потерь на каплеунос, и других потерь. Требуемый объем обычно измеряется расходомером; если расходомер не предусмотрен, то он может быть рассчитан, как показано ниже:

$$M = E \times \frac{(CR)}{(CR - 1)}$$

5. **Коэффициент упаривания ( $CR$ ):** Подпиточная вода, которую добавляют в рециркуляционную систему охлаждающей воды, содержит растворенные примеси. При испарении воды образуется чистый пар  $H_2O$ , а примеси остаются в воде. Отношение концентрации солей в оборотной воде ( $C_B$ ) к концентрации солей в подпиточной воде ( $C_M$ ) и получило название коэффициента упаривания.

$$CR = C_B / C_M$$

Поскольку количество поступающих солей должно равняться количеству солей, выводимых из системы, то:

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

$$M \times C_M = V \times C_B$$

Где:  $M$  - поток подпиточной воды, а  $V$  представляет собой потери концентрированной воды. Следовательно, отношение концентраций примесей также равно:

$$CR = M/V$$

Для определения того, если в системе "баланс",  $CR$  следует рассчитывать сразу для нескольких отдельных компонентов воды. В идеальном случае наличия "баланса" в системе,  $CR$  всех ионов в воде (Ca, Mg, щелочность, и т.д.) равны. Если отношения концентраций примесей не равны, это указывает на то, что некоторые минералы ( $CaCO_3$ ,  $SiO_2$ , и т.д.) выпадут в осадок при рециркуляции воды. Например, если  $CR$  кальция или щелочности, более чем на 0.5 ниже  $CR$  магния, то, вероятнее всего, в этой системе водяного охлаждения будет выпадать в осадок  $CaCO_3$ . Зная, что именно может выпасть в осадок,  $CR$  может быть ценным индикатором возникающей проблемы.

Химические вещества, вводимые в качестве добавок в системы водяного охлаждения, могут оказывать негативное влияние на отношение концентраций примесей некоторых ионов.  $CR SO_4^{2-}$  может увеличиться при добавлении серной кислоты или если воздух завода содержит  $SO_2$ . В этих случаях  $CR$  щелочности понизится, т.к. щелочь разрушается под действием кислоты, добавленной в воду градирни. В результате хлорирования охлаждающей воды увеличится  $CR Cl^-$ . Удельная электропроводность, основанная на  $CR$ , также будет увеличена при добавлении некоторых химических веществ, используемых для химической обработки.

Как показано на рис. 38.7, даже очень небольшая концентрация значительно уменьшают потребность в воде, и чем выше  $CR$ , тем меньше потребность в воде, поскольку скорость испарения близка к предельному значению.

6. *Частичный сброс оборотной воды (продувка) ( $B$ ):* Поскольку при испарении в воздух выделяется чистый водяной пар, то растворенные и взвешенные вещества остаются в концентрате. Если нет никаких других потерь воды, кроме как от испарения, то концентрация твердых веществ в воде будет такой же высокой, как в морской воде, что приведет к значительному образованию накипи и коррозии. Чтобы сбалансировать состав воды, из циркуляционной системы предусматривается частичный регулируемый сброс. Этот частичный сброс оборотной воды ( $B_R$ ) рассчитывается и регулируется таким образом, чтобы удаление твердых веществ происходило с такой же скоростью, что и их попадание в охлаждающую воду с подпиточной водой.

В системе также имеются и другие неуправляемые потери воды. К одним из них относится - унос капель воды воздухом ( $B_D$ ); к другим - утечки ( $B_L$ ), которые иногда происходят намеренно, однако, обычно носят случайный характер. При расчете полного частичного сброса оборотной воды необходимо учитывать все вышеуказанные потери:

$$B = B_R + B_D + B_L$$

Частичный сброс оборотной воды также связан с другими факторами, следовательно:

$$B = M - E$$

и

$$B = M/CR$$

7. *Унос капель воды воздухом ( $B_D$ ):* Несмотря на то, что испаряющая вода чистая, при ее прохождении через испарительное оборудование может наблюдаться унос некоторого количества капель воды воздухом, как легкого тумана. Чтобы свести такие потери приблизительно к 0.0005% от объема во-

ды в замкнутой рециркуляционной системе, в современных градирнях применяются очень сложные брызго- и туманоуловители. Обычно в градирнях потери воды из-за уноса капель воды воздухом составляют примерно от 0.05 до 0.2% от объема воды в рециркуляционной системе. Поскольку в уносимых каплях воды содержатся твердые примеси, то, фактически, такой унос представляет собой частичный сброс оборотной воды. В отсутствие регулируемого частичного сброса оборотной воды, или в случае, если кто-то намеренно закрыл вентиль и приостановил частичный сброс, такой унос, в отсутствие других потерь воды в системе, создает максимальное отношение концентраций.

8. *Потери в системе ( $V_L$ ):* Потери оборотной воды на предприятии часто происходят из-за ее утечки через уплотнения насосов или клапанов; при использовании воды для прямого охлаждения сальников насосов, рубашек компрессора или подшипников; или при ее заборе для таких областей применения, как мойка оборудования или полов, в том случае, если магистраль охлаждающей воды находится вблизи того места, где имеется потребность в воде. На многих заводах существует масса причин использования оборотной охлаждающей воды, что делает невозможным создание отношения концентраций выше 1.2 - 1.5. Это создает ограничения при выборе экономически эффективных программ химической обработки воды и не способствует ее экономии.
9. *Объем системы ( $V$ ):* Обычно большая часть воды в системе находится в чаше градирни или камере охлажденной воды. Приблизительная вместимость системы может быть получена путем вычисления объема воды в чаше, добавив к нему дополнительные 20-30 %, т.е. объем воды, находящейся в трубах и оборудовании. Однако если в системе имеется необычно большое число конденсаторов с открытыми камерами, аппаратов с рубашками и печей, вмещающих значительные объемы воды, то потребуется больший процент дополнительного увеличения.
10. *Время/цикл ( $t$ ):* Один цикл определяется как время, которое требуется воде, чтобы пройти 1 раз по всему контуру оборотного водоснабжения. Это время представляет собой отношение объема системы к скорости циркуляции оборотной воды в системе.

$$t = V/Q_c$$

11. *Показатель периода полурасхода (НП):* Показатель периода полурасхода определяет период полурасхода химического вещества, вводимого в систему испарительного охлаждения в целях ее химической обработки. С математической точки зрения, этот показатель представляет собой период времени, необходимый для растворения добавленного в воду химического вещества на 50% от его первоначальной концентрации после того, как добавление этого химического вещества было прекращено. Это - также период времени, требуемый для увеличения концентрации твердых примесей, поступивших в систему с подпиточной водой, в 2 раза. Это - очень важный показатель для определения контрольных пределов в тех случаях, когда подача химического вещества может быть прекращена. Также это - очень важный показатель для определения эффективной дозировки химических веществ, используемых для биологической очистки и вводимых в систему. Кривая степени растворения химического вещества, вводимого в систему градирни, представлена на рис. 38.8.

### Расчет показателя периода полурасхода

Период полурасхода системы зависит от ее вместимости и скорости, с которой

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

компоненты покидают систему. Для градирни период полурасхода зависит, главным образом, от вместимости системы и скорости продувки. В наиболее простой форме уравнение, по которому можно рассчитать период полурасхода, выглядит следующим образом:

$$HTI = 0.693 \times \frac{\text{объем (галлоны)}}{E \text{ (галлоны/мин)}}$$

где  $0.693 = \ln 2.0$  - число, полученное из стандартного уравнения расчета периода полурасхода.

Чтобы проиллюстрировать зависимость периода полурасхода от других элементов системы охлаждения, можно изменить коэффициенты, используемые для расчета частичного сброса воды:

$$HTI = 0.693 \times \frac{(CR - 1) \times \text{объем (галлоны)}}{E}$$

или:

$$HTI = 0.693 \times \frac{(CR - 1) \times \text{объем (галлоны)}}{Q_c \times \Delta T \times 0.001}$$

Это говорит о том, что изменение нескольких коэффициентов ( $Q_c$ ,  $\Delta T$ ,  $CR$ , или объем) оказывает влияние на  $HTI$ .

Другой способ вычисления периода полурасхода можно иллюстрировать на следующем примере:

1. Вычисляем время на цикл,  $t$ .
2. Из табл. 38.1 определяем число циклов, требуемых для достижения преобладающего отношения концентраций, на основе перепада температуры в градирне или бассейне с разбрызгиванием.
3. Умножаем это число циклов на время/цикл для получения периода полурасхода, выраженного в минутах, а затем делим его на 60 или 1440 для преобразования в часы или, соответственно, в дни.

**Таблица 38.1** Число циклов, необходимых для получения определенной концентрации, в отсутствие продувки

Коэффициент упаривания	Перепад температуры в градирне		
	10°	20°	30°
1.1	6.5 циклов	3.2 цикла	2.1 цикла
1.3	20.2	10.2	7.0
1.5	34.5	17.2	11.7
1.8	55	28	19
2.0	69	34	23
2.5	105	52	35
3.0	138	70	47
3.5	174	87	58
4.0	208	104	70
4.5	241	120	81
5.0	324	162	93

Этот расчет можно проиллюстрировать на следующем примере:

1. *Скорость рециркуляции воды в системе:* На фирменной табличке насоса указана скорость рециркуляции воды системе - 5500 галлонов/мин (21 м<sup>3</sup>/мин). Для расчета фактической скорости рециркуляции мы, для удобства, возьмем показатель 5000 галлонов/мин (19 м<sup>3</sup>/мин).
2. *Перепад температур:*  
 $105^{\circ}\text{F} - 85^{\circ}\text{F} = 20^{\circ}\text{F}$   
 $(41^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 11^{\circ}\text{C})$
3. *Потери за счет испарения:* 20 °F (11 °C) означает 2%-ную потерю воды за счет испарения:

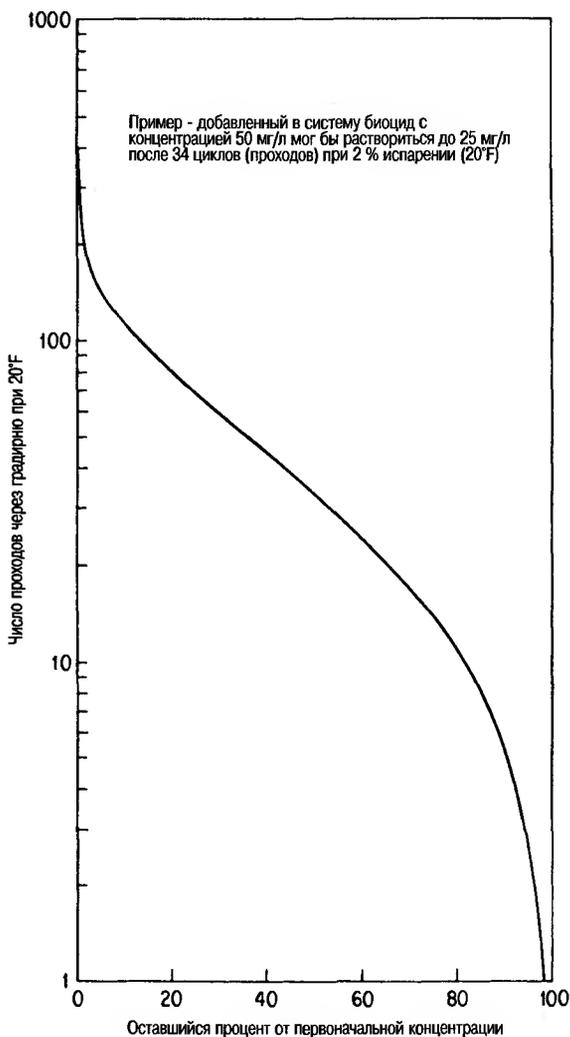


Рис. 38.8 Влияние продолжительности пребывания в системе и степени разбавления подпиточной водой на дозировку химического вещества, добавляемого в систему испарительного охлаждения:

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

Анализы, данные о которых приведены в таблице ниже							
А. Подпиточная вода _____		D. _____					
В. Обратная охлаждающая вода _____		E. _____					
С. Коэффициент упаривания _____		F. _____					
Компоненты	В пересч. на	А	В	С	D	E	F
Кальций	CaCO <sub>3</sub>	182	526	2.8			
Магний	"	78	240	3.1			
Натрий (по разности)	"	40	120				
Общее содержание электролита	CaCO <sub>3</sub>	305	886	2.9			
Бикарбонат	CaCO <sub>3</sub>	190	80				
Карбонат	"	0	0				
Гидроксил	"	0	0				
Сульфат	"	84	696	8.3*			
Хлорид	"	29	94	3.2*			
Нитрат	"	2	6				
Хромат	"	0	10	--			
М-щелочность	CaCO <sub>3</sub>	190	80				
Р щелочность	"	TR	0				
Двуокись углерода		TR					
pH		8.3	7.5				
Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	22	68	3.1			
Железо	Fe	0.3					
Мутность		10					
Солесодержание		360	не опред.				
Цветность		отсутств.					
* Не имеет значения, поскольку в систему добавляются Cl <sub>2</sub> и H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>							

**Рис. 38.9** Коэффициент упаривания примесей в системе испарительного охлаждения:

$0.02 \times 5000 = 100$  галлон/мин - потери воды за счет испарения.

4. *Коэффициент упаривания* (см. анализы на рис. 38.9): Анализы подпиточной и оборотной воды показывают коэффициент упаривания от 2.8 до 8.3. Если взять магний и двуокись кремния, то приблизительно коэффициент

упаривания 3,0, так как магний и двуокись кремния остаются растворимыми при преобладающих значениях pH и концентрации. Хлор и серная кислота вводятся в систему и, следовательно, отпадает необходимость в использовании  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в качестве ценных индикаторов CR.

5. Подпитка:

$$M = E \times \frac{(\text{CR})}{(\text{CR} - 1)}$$

$$M = 100 \times \frac{3}{2} = 150 \text{ галлонов/мин}$$

$$(M = 0.38 \times \frac{3}{2} = 0.57 \text{ м}^3/\text{мин})$$

6. Вместимость системы: Чаша вмещает 72000 галлонов (284 м<sup>3</sup>). Полная вместимость системы оценивается равной 100000 галлонам (379 м<sup>3</sup>).

7. Время / цикл:

$$t = \frac{100000}{5000} = 20 \text{ мин}$$

$$(t = \frac{379 \text{ м}^3}{19 \text{ м}^3/\text{мин}} = 20 \text{ мин})$$

8. Период полурасхода: Если CR = 3, и ΔT = 20 °F (11 °C), то согласно табл. 38.1, среднее число циклов составляет 70; при 70 циклах:

$$\text{HTI} = 70 \times 20 = 1400 \text{ мин. или } 23 \text{ ч}$$

## ГРАДИРНИ

Градирни используются для испарения воды при ее непосредственном контакте с воздухом. Классификация градирен основана на применяемых методах впуска потока воздуха (естественная или искусственная тяга), а также по направлению потока воздуха (градири с противотоком или с поперечным движением воздуха по отношению к нисходящему потоку воды).

В градирнях естественной тяги движение потока воздуха зависит от окружающей атмосферы, которая создает разницу в плотности более теплого воздуха, находящегося внутри градирни, и воздуха окружающей среды; на движение потока воздуха также оказывает влияние скорость ветра. Большинство градирен естественной тяги, используемых современными коммунальными предприятиями, представляют собой градирни естественной тяги с гиперболической поверхностью (рис. 38.10); такие градирни уже многие годы работают в Европейских странах. Высокая конструкция градирен обеспечивает охлаждение без использования вентиляторов, а также сводит к минимуму проблемы, связанные с загрязнение окружающей среды выбросами, и уносом капель воды воздухом.

В градирнях искусственной тяги, вместо того, чтобы полагаться на естественную тягу или скорость ветра, для перемещения воздуха используют вентиляторы. Вентиляторы ускоряют процесс охлаждения и повышают КПД градирен за счет увеличения скорости перемещения воздушной массы над капельками воды, стекающими внутри градирни. Поэтому градирни искусственной тяги могут испарять гораздо больше воды по сравнению с градирнями естественной тяги тех же размеров.

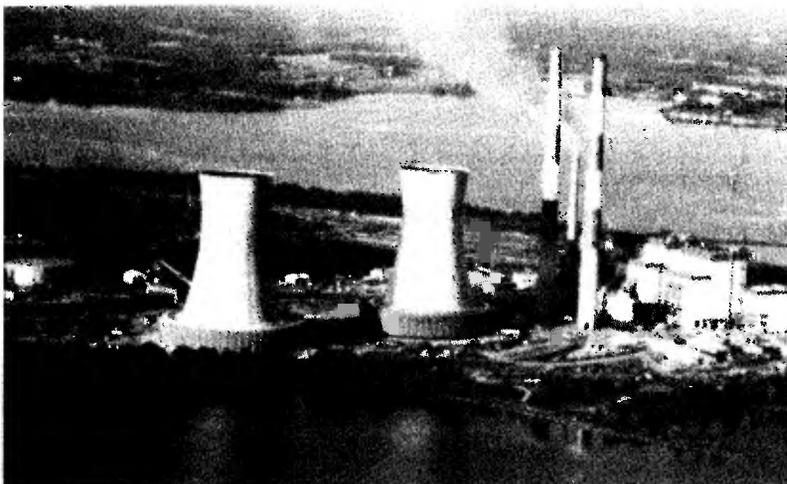


Рис. 38.10 Градири с гиперболической поверхностью, используемые для охлаждения воды конденсаторов на коммунальном предприятии (фотография любезно предоставлена The Marley Company.)

Существуют два типа градирен искусственной тяги: градирни с нагнетательным вентилятором и градирни с отсасывающим вентилятором. В градирнях с нагнетательным вентилятором (рис. 38.11) вентиляторы, установленные сбоку градирни, нагнетают воздух через насадку градирни, в результате чего происходит смешение воздуха с ниспадающими каплями воды.

Градирни с отсасывающими вентиляторами (рис. 38.12) - это градирни с противотоком или поперечным движением воздуха, в которых вентиляторы установлены в верхней части градирни, пропуская охлаждающий воздух либо через, либо в горизонтальном направлении по отношению к ниспадающим каплям воды. Выбор градирен с нагнетательным или отсасывающим вентилятором основывается на инженерных соображениях с учетом преобладающих погодных условий. Самое главное, чего следует избегать - это рециркуляции сбрасываемого теплого воздуха, которая может немало снизить КПД градирни. Основное преимущество градирен с противотоком заключается в том, что вода с самой низкой температурой контактирует с самым сухим воздухом, обеспечивая наиболее эффективную последовательность испарения. Пример подробного анализа представлен на рис. 38.14.

### **ОБРАБОТКА И КОНТРОЛЬ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ**

Каждая система водяного охлаждения представляет собой уникальную комбинацию оборудования, химии воды, имеющихся в системе загрязняющих примесей, частичного сброса воды и инженерных решений относительно контроля за состоянием охлаждающей воды. Для правильного выбора надлежащей программы химической обработки охлаждающей воды необходим сбор значительного объема информации. Это часто является очень трудоемкой задачей из-за сложности применяемого механического оборудования, а также из-за различных изменений в рабочих условиях. На рис. 38.13 и в табл. 38.2. приведен пример подробного анализа системы по пяти основным категориям: (1) Данные по системе водяного охлаждения; (2) Химия охлаждающей воды; (3) Данные по

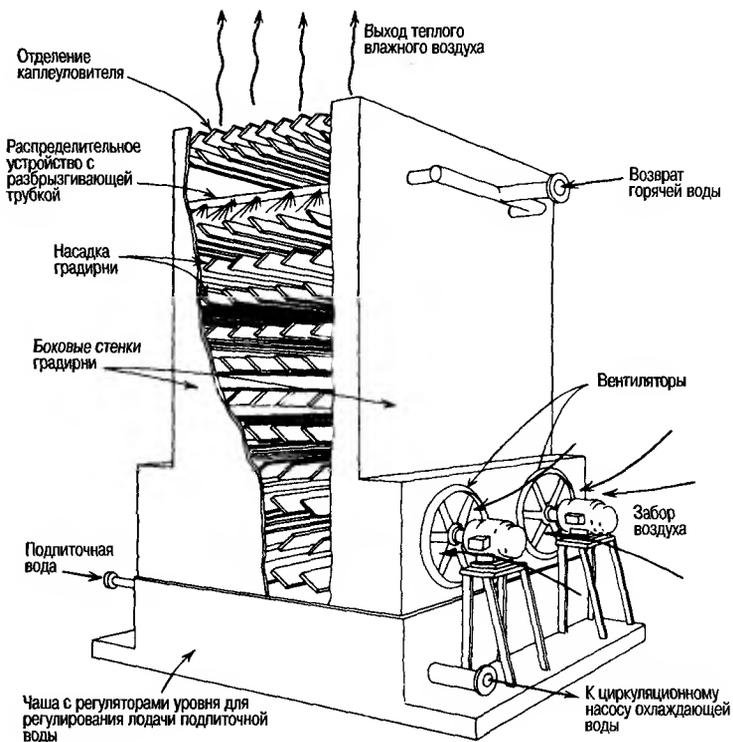


Рис. 38.11 Конструкция градирни с нагнетательным вентилятором. Такие градирни находили широкое применение до того, как была разработана конструкция градирни с отсасывающим вентилятором. Вентиляторы и электродвигатели размещены таким образом, чтобы обеспечить легкий доступ для проведения техобслуживания.

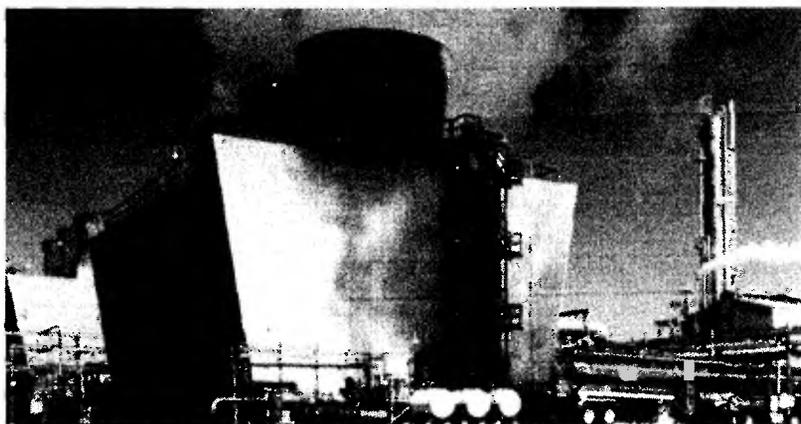


Рис. 38.12 Конструкция градирни с отсасывающим вентилятором. Забор воздуха происходит через вентиляционные решетки градирни, затем воздух распределяется по всей градирне и сбрасывается в атмосферу в верхней ее части.





## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

В этом разделе дается характеристика химической среды, в которой функционирует система. Информация представлена по двум разделам: химия подпиточной и оборотной воды, включая описание процессов предварительной обработки, а также источников и типа загрязняющих веществ, присутствующих в оборотной воде. Необходимо проанализировать причину низкого качества подпиточной воды и наиболее вероятные источники ее загрязнения; эти вопросы играют очень важное значение для правильного выбора программы ее химической обработки, следовательно, решающим фактором при выборе программы химической обработки является возможность принятия коррективных мер.

### Данные по теплопередаче

Этот раздел анализа подразделяется на 4 части.

1. **Мониторинг результатов:** дается определение того, каким образом проводится оценка теплопередачи, включая использование образцов для испытаний на коррозионную агрессивность и проверочных теплообменников; данные по теплообменникам, используемым на предприятии, дающие возможность выполнять расчеты и текущий контроль скорости (коэффициентом) теплопередачи.
2. **Методы контроля:** дается определение методов контроля теплопередачи. Например, обычный метод, используемый на большинстве предприятий, заключается в установке дроссельной заслонки на входе охлаждающей воды в определенные теплообменники в зимний период времени для предотвращения переохлаждения технологического процесса. Однако такое дросселирование снижает скорость потока воды и создает возможность ее загрязнения, что, в свою очередь, приводит к потере теплопередачи, которая не всегда может быть восстановлена путем повторного открытия дроссельной заслонки. Вместо установки дроссельной заслонки на потоке воды можно предусмотреть альтернативные методы контроля, например, рецикл воды или байпасирование потока технологической среды.
3. **Фактические условия:** дается определение физических условий теплообменного оборудования, проинспектированного в ходе анализа; к данному определению прилагаются результаты анализа большого количества отложений. Эта информация берется за основу при подготовке рекомендаций по очистке и предварительной подготовке металлургических поверхностей, а также применению химических веществ для надлежащего техобслуживания системы.
4. **Методы очистки:** в данном разделе описаны применяемые в настоящий момент методы механической и химической очистки.

### Анализ системы сточных вод предприятия

В некоторых системах водяного охлаждения сточные воды отводятся непосредственно в водоприемник; в других – для их обработки используют различные процессы, а в третьих – сточные воды направляются в муниципальные канализационные системы. Каждый из этих методов предполагает тщательный анализ выбранной и используемой программы химической обработки сточных вод.

### Текущий и последующий контроль

Для эффективной реализации программ химической обработки охлаждающей воды необходим контроль за добавляемыми в воду химическими веществами, мониторинг результатов и коррективные действия. В помощь разработке и реализации программ химической обработки сточных вод имеются различные

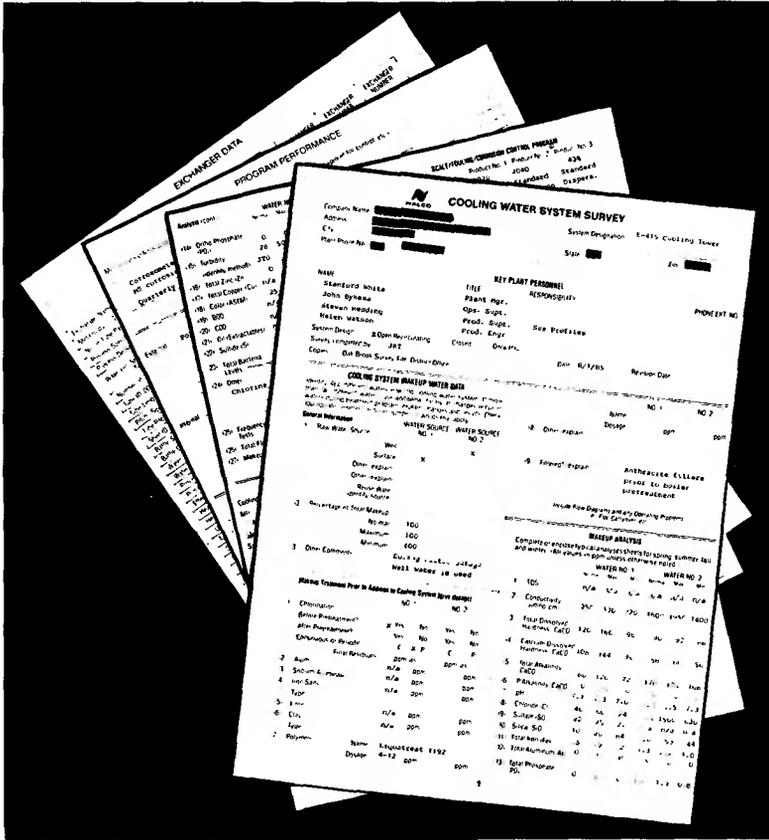


Рис. 38.14 Полный анализ системы водяного охлаждения

методы аналитического контроля и средства мониторинга, гарантирующие хорошие результаты их выполнения.

Цель анализа и мониторинга заключается в идентификации возможных проблем прежде, чем эти проблемы возникнут. Под диагностикой подразумевают:

1. Анализ воды (на местах и в лаборатории)
2. Анализы отложений (органических, неорганических и микробного происхождения)
3. Средства мониторинга коррозионной агрессивности и отложений
4. Металлографические исследования
5. Микробные исследования

В табл. 38.3 представлены еще несколько важных переменных, которые необходимо контролировать в системах водяного охлаждения. Кальциевая и магниевая жесткость определяет тенденцию воды к накипеобразованию. Общая щелочность, pH и температура определяют наличие в воде ионов карбонатов и

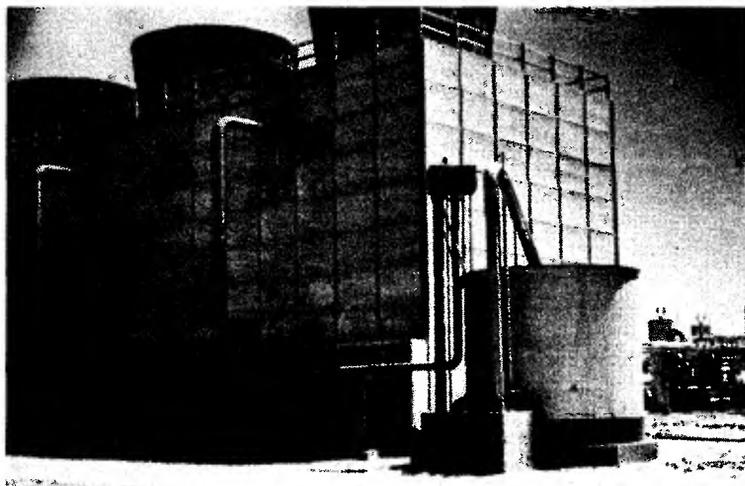
## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

бикарбонатов, а также способность карбоната кальция к растворению. Для гарантии отсутствия накипи в системе все эти переменные должны поддерживаться в допустимых пределах посредством осуществления постоянного контроля. Необходимо также контролировать уровень содержания сульфата и двуокиси кремния, которые могут привести к образованию формирований из гипса и кремнезема.

**Таблица 38.3** Наиболее важные переменные при анализе охлаждающей воды

Переменная	Эффект
Ca, Mg M, pH, T	Свидетельствует о тенденции воды к образованию накипи. Свидетельствует о высокой концентрации карбонатов и бикарбонатов, а также о растворимости карбоната кальция.
SO <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub>	Необходимо контролировать их концентрации во избежание сульфатных и силикатных отложений
Взвешенные вещества	Вызывают загрязнение, требуется добавка диспергирующих агентов
Загрязняющие примеси: Углеводороды, Гликоли, NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	Вызывают загрязнение и рост микробной массы, требуются высокие концентрации хлора и химическая обработка для удаления осадка

Во многих системах содержатся взвешенные твердые вещества, которые концентрируются в градирне и способствуют ее обрастанию. Если проблема идентифицирована точно, то для борьбы с ней можно использовать различные диспергирующие агенты. Некоторые твердые вещества могут попасть в систему с подпиточной водой, другие - с воздухом, третьи - могут представлять собой продукты осаждения или микробные массы. Если твердые взвешенные вещества находятся в избыточном количестве, о чем свидетельствует закупорка труб, то в контур охлаждающей воды необходимо включить систему фильтров



**Рис. 38.15** Этот автоматический модуль бесклапанного безнапорного фильтра диаметром 15 футов установлен на боковом потоке градирни на установке природного газа в Техасе.

для фильтрования части оборотной воды в объеме, приблизительно соответствующем скорости испарения воды, см. рис. 38.15. Конструкция такого фильтра на боковом потоке должна быть такой, чтобы избежать обратной промывки, поскольку такая промывка означает неконтролируемые потери воды при ее частичном сбросе из системы. Необходимо иметь в виду, что такие фильтры могут стать инкубаторами для роста бактерий, если, конечно, не проводить регулярную обработку воды биоцидами.

В табл. 38.4 представлены некоторые основные химические компоненты, используемые для химической обработки охлаждающей воды. При использовании этой таблицы обратите внимание на то, что ни один из компонентов сам по себе не является полезным. Например, нормальный контроль за образованием коррозии затруднен или вообще невозможен в загрязненной системе, в которой имеется накипь. Надлежащий контроль за накипеобразованием и обрастанием системы поможет поддерживать стенки труб в чистом состоянии и, тем самым, сведет к минимуму дозу вводимых в систему ингибиторов коррозии. Как показано в таблице 38.4, многие химические вещества помогают решать более чем одну проблему. Однако, ответ на вопрос, является ли конкретное химическое вещество наиболее оптимальным для данной системы, зависит только от конкретных условий, присущих именно этой системе.

**Таблица 38.4** Химические компоненты, используемые для обработки охлаждающей воды

Химическая обработка	Коррозия	Образование накипи	Проблемы	
			Обрастание	Микробные массы
Хроматы	x			
Цинк	x			
Молибдаты	x			
Силикаты	x			
Полифосфаты	x	x		
Сложные эфиры				
высокомолекулярных спиртов		x		
Фосфонаты	x	x		
Полностью органические соединения	x	x	x	
Природные органические соединения			x	
Синтетические полимеры		x	x	
Неокисляющие биоциды			x	x
Хлор/бром				x
Озон				x

## **ВЛИЯНИЕ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА**

Градири очищают пропускаемый через них воздух, создавая, тем самым, условия для испарения; при этом расход воздуха составляет примерно 200 футов<sup>3</sup> на галлон воды (приблизительно 1500 м<sup>3</sup> воздуха на кубический метр воды). Поэтому не удивительно, что воздух окружающей среды оказывает большое влияние на работу системы водяного охлаждения.

В некоторых районах содержание пыли в воздухе очень велико, особенно это характерно для засушливых районов страны, где часто имеют место песчаные бури. В западных и юго-западных районах Соединенных Штатов такие проблемы возникают довольно часто, и, следовательно, системы водяного охлаждения, расположенные в этих районах, не могут работать эффективно без фильтрации бокового потока. На большом промышленном предприятии, ис-

## ОБРАБОТКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

точником твердых веществ может быть воздух (дорожная пыль, открытые участки между заводскими корпусами или открытые хранилища твердых веществ, например, руды или угля), и этот самопроизвольно возникающий источник макрочастиц является не менее опасным, чем ил, и также требует фильтрации бокового потока.

Еще более острая и труднорешаемая проблема заключается в присутствии в воздухе кислых или щелочных газов. Эти газы оказывают влияние на pH системы - наиболее критический показатель при реализации программ химической обработки, имеющий непосредственное отношение к способности воды к образованию накипи или коррозии. Можно привести довольно необычный, однако подходящий для этого случая пример расположения градирни производства аммиака между установками производств аммиака и азотной кислоты. Когда ветер дует в одном направлении, наличие аммиака в воздухе способствует повышению значения pH воды в системе; когда ветер меняет направление, содержание в воздухе кислых газов окиси азота, наоборот, способствуют его понижению. Хотя этот пример - явное преувеличение, однако, можно сделать вывод о том, что на большинстве предприятий направление ветра может оказывать влияние на показатель pH системы водяного охлаждения.

Из газов, присутствующих в воздухе, в первую очередь следует выделить кислые газы, и, в частности,  $\text{CO}_2$ , концентрация которого в атмосферном воздухе составляет, в среднем, 0.03 объемных %. Концентрация  $\text{CO}_2$ , содержащегося в воде при температуре около  $68^\circ\text{F}$  ( $20^\circ\text{C}$ ), при таком парциальном давлении составляет менее 1 мг/л. Однако, фактическое содержание  $\text{CO}_2$  в системе градирен различных предприятий значительно отличается в зависимости от местных атмосферных условий, например, в зависимости от наличия на предприятии дымовой трубы для сброса отходящих газов.

Между  $\text{CO}_2$ , щелочностью и pH существует определенная взаимозависимость. (См. Главу 4). Если содержание двуокиси углерода не является постоянным, то для поддержания требуемой величины pH, необходимо изменять также и щелочность. Поэтому трудно предсказать, какая концентрация щелочи потребуется для достижения конкретного показателя pH в системе. Все это определяется эмпирическим путем.

Если опыт показывает, что концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе является постоянной, то для конкретного показателя pH в системе можно рассчитать и концентрацию щелочи. В этом случае значение pH будет изменяться подобно логарифмической функции: то есть, если содержание щелочи увеличивается в два раза, значение pH увеличивается на  $\log 2$ , или на 0.3 единицы pH; и, точно так же, если концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе увеличивается в два раза при постоянной концентрации щелочи, значение pH понижается на  $\log 2$  или на 0.3 единицы pH. Ожидаемое равновесие pH в любой новой системе может быть установлено только эмпирически, поскольку пока еще нет опыта создания такого равновесия вблизи новых градирен, так же как и нет явного свидетельства того, что концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе поддерживается на уровне примерно 0.03 %.

### **КОНТРОЛЬ ЗА НАКИПЕОБРАЗОВАНИЕМ И КОРРОЗИЕЙ**

В системах оборотной охлаждающей воды борьба с коррозией проводится посредством применения неорганических или органических ингибиторов коррозии. Из неорганических ингибиторов наиболее часто применяются четыре: хромат, цинк, ортофосфат, и полифосфат. Реже применяются молибдат, нитриты, нитраты, различные органические азотистые соединения, силикаты и природные органические соединения.

На начальном этапе для обработки оборотной охлаждающей воды использовались неорганические полифосфаты и природные органические соединения.

В основу была положена концепция о том, что, добавив в систему незначительное количество кислоты, можно контролировать показатель устойчивости в системе, поскольку такая концентрация приведет лишь к незначительному образованию накипи. К органическим ингибиторам коррозии относятся органические фосфорные соединения, некоторые синтетические полимеры, органические азотистые соединения, и карбоновые кислоты с длинной цепью.

При проведении программы химической обработки в систему добавляли такие ингибиторы коррозии и накипеобразования, как полифосфат и природные органические соединения. Введение полифосфатов в качестве ингибиторов для борьбы с накипью проводилось в качестве заключительного этапа обработки. Кроме того, полифосфат, смешиваясь с кальцием, образовывал катодный ингибитор, снижающий скорость коррозии. Природные органические соединения способствовали поддержанию металлических поверхностей в относительно чистом виде и вместе с ингибитором образовывали на них защитную пленку. Природные органические соединения также способствовали дисперсии взвешенных твердых веществ и модифицировали структуру карбоната кальция и среднего фосфата кальция, если прослеживалась тенденция осаждения этих соединений на горячих поверхностях.

Самый большой недостаток этой программы химической обработки заключается в переходе полифосфата в ортофосфат, который, соединяясь с кальцием, образует накишь фосфорнокислого кальция. По этой причине эта программа была преобразована в программу стабилизации фосфата. При такой химической обработке орто- и полифосфаты использовали как ингибиторы коррозии. Для предотвращения осаждения фосфорнокислого кальция, значение pH обычно поддерживали на уровне 7,0, а для дисперсии и стабилизации фосфорнокислого кальция добавляли конкретные синтетические полимеры.

Затем появилась программа обработки охлаждающей воды хроматом - исключительно надежным ингибитором коррозии. Сначала дозы добавляемого хромата были очень большими: от 200 до 300 мг/л в пересчете на  $\text{CrO}_4$ . Во избежание выпадения в осадок карбоната кальция, необходимо было понизить значение pH в системе до 6-7 единиц; для этого в систему вводилась кислота. Такая обработка давала хорошие результаты как в плане борьбы с накипью, так и борьбы с коррозией. Однако и в ней был отмечен один недостаток - когда концентрация хромата становилась низкой появлялась возможность питтинговой коррозии. Было обнаружено, что если смешать хромат с другими ингибиторами, особенно катодного типа (например, с цинком и полифосфатом), то концентрация хромата может быть уменьшена до 20 - 30 мг/л в пересчете на  $\text{CrO}_4$ , и обработка будет иметь гораздо лучшие результаты по сравнению с теми, которые были получены при использовании только хромата при концентрации 200 - 300 мг/л в пересчете на  $\text{CrO}_4$ . Использовали также комбинированный вариант химической обработки воды хроматом, при котором в воду периодически добавляли кислоту для поддержания значения pH в пределах от 6 до 7 единиц. Дополнительное преимущество такого комбинированного подхода заключалось в повышении безопасности системы, поскольку кислота препятствовала образованию питтинговой коррозии в случае, если в какой-то период концентрация хромата в воде была недостаточной.

В настоящее время такие комбинированные составы, используемые для химической обработки охлаждающей воды хроматом, рассматриваются как наиболее оптимальные для борьбы с коррозией. Однако проблемы загрязнения окружающей среды стимулируют разработку новых комбинированных вариантов химической обработки воды хроматом, позволяющих значительно снизить концентрацию хромата в системе оборотной воды, доводя ее, максимум, до 10 мг/л в пересчете на  $\text{CrO}_4$  при одновременном обеспечении приемлемого уровня защиты системы от коррозии. При таком подходе для достижения намеченных результатов необходимо постоянно контролировать значение pH воды и поддерживать систему в чистом состоянии за счет добавления в нее диспергирую-

щих агентов и биоцидов. Очевидное ограничение такого подхода состоит в том, что резерва защиты, который имеется при более высоких концентрациях  $\text{CrO}_4$ , не существует. Поэтому загрязнение воды технологической жидкой средой, неуправляемая микробная активность, осаждение твердых веществ и обработка системы гораздо быстрее приведут к отказу системы, по сравнению с традиционным вариантом использования хромата в концентрации 20 - 30 мг/л в пересчете на  $\text{CrO}_4$ .

Хотя хромат в течение многих лет успешно использовался для борьбы с коррозией, возросшие экологические проблемы указали на необходимость разработок новых ингибиторов коррозии, менее опасных для окружающей среды. На начальном этапе таких исследований были получены цинк-органические соединения. Поскольку прочность пленки, образуемой цинком - катодным ингибитором - более низкая по сравнению с пленкой, образуемой хроматом, при химической обработке воды цинк-органическими соединениями рН системы повышали до 7 - 8 единиц, чтобы сделать воду менее коррозионно агрессивной, позволяя цинку обеспечить приемлемую защиту. В качестве органического соединения, применяемого при такой программе химической обработки, использовали диспергирующий агент, чтобы очистить систему от отложений, и, таким образом, способствовать образованию цинком защитной пленки. В дополнение к диспергирующим агентам, для повышения растворимости цинка при более высоких значениях рН, необходимых при таком способе обработки, использовались определенные органические соединения. Эти программы химической обработки воды были внедрены на многих промышленных предприятиях, но так как пленка, образованная таким ингибитором при рабочих значениях рН, не обеспечивала столь же эффективной защиты, как пленка, образованная хроматом, эти программы не нашли такого же широкого применения, как традиционные программы химической обработки воды хроматом.

Впоследствии была разработана новая творческая концепция в отношении химии охлаждающей воды, в результате которой появились фосфор-органические соединения. Подобно неорганическим полифосфатам, эти соединения создавали барьерный эффект и препятствовали образованию накипи. Однако на этом их сходство заканчивается; неорганические полифосфаты легко переходят в ортофосфаты с увеличением времени выдержки в системе, температуры и микробной деятельности. Фосфоро-органические соединения не переходят в полифосфаты при нормальных условиях работы градирни, за исключением тех условий, когда имеет место сильное микробиологическое воздействие. Кроме того, в отличие от неорганических полифосфатов, фосфор-органические соединения часто служат ингибиторами осаждения карбоната кальция и других накипеобразующих соединений при более высоком рН и щелочности, чем те, которые могут выдерживать неорганические полифосфаты. Это открытие привело к другому открытию, которое в настоящее время известно как химическая обработка систем водяного охлаждения щелочью.

Основная задача химической обработки – увеличить значение рН в системе примерно до 7.5 - 9.0 единиц, и, таким образом, существенно уменьшить естественную коррозионную активность оборотной воды. Опыт показывает, что хотя более высокие значения рН способствуют еще большему снижению коррозионной агрессивности оборотной воды, однако, часто на практике такое снижение не является достаточным для защиты всех систем из низкоуглеродистой стали, особенно теплообменников из низкоуглеродистой стали с высокими тепловыми потоками или низкими скоростями потока воды. Следовательно, для борьбы с коррозией и накипеобразованием требуется набор органических ингибиторов. Обычно в такой набор входят фосфоро-органические соединения, синтетические полимеры и ароматические азолы. Эти ингибиторы незаменимы для борьбы с коррозией стальных поверхностей и поверхностей из медных сплавов, а также для борьбы с накипью и отложениями.

Другой способ щелочной обработки предполагает использование современ-

ных средств борьбы с накипью и отложениями наряду с более традиционными ингибиторами коррозии. Фосфор-органические соединения и полимеры могут быть дополнены неорганическими веществами, например, хроматом или цинком. Такие программы помогают реализовывать программы с использованием органических ингибиторов, где могут использоваться хромат или цинк.

Существенное преимущество щелочной обработки по сравнению с более ранними программами химической обработки заключается в буферной емкости, обеспечиваемой водой, уменьшающей негативное влияние нарушений в системе на ее работу. Другое преимущество щелочной обработки заключается в значительном уменьшении или в отдельных случаях в отказе от добавки в систему кислоты. Однако, этот вариант, конечно, зависит от химии воды в системе.

## **БОРЬБА С ОБРАСТАНИЕМ СИСТЕМЫ**

Контроль за отложениями в системах водяного охлаждения является крайне необходимым для поддержания соответствующих скоростей (коэффициентов) теплопередачи. Однако, контроль за отложениями часто более затруднен в системах, в которых в воде содержится в значительной концентрации щелочь, чем в системах с низкими значениями pH. Подпиточная вода может содержать растворенные твердые вещества, органические и взвешенные твердые вещества, каждые из которых вносят свой вклад в обрастание системы. Система может стать чрезвычайно загрязненной микробами; например, в случае, если подпиточная вода с высоким БПК (городские или промышленные сточные воды), является особенно восприимчивой к загрязнению слизеобразующими бактериями.

В табл. 38.5 показаны некоторые источники загрязнения, характерные для типичной системы оборотной воды. Из сырой воды и воздуха в систему попадают коллоидные органические вещества, илстые наносы, растворимое железо и микробы. Вблизи промышленных предприятий с воздухом в систему может попасть сероводород, двуокись серы и аммиак.

Выбор надлежащего диспергирующего агента для любой действующей системы основан на фактическом анализе имеющихся в системе отложений. Для борьбы с микробными и органическими отложениями обычно используются синтетические органические соединения, включая полимеры и поверхностно активные вещества.

**Таблица 38.5** Источники загрязнения систем оборотной воды

Подпиточная вода	Воздух	Оборотная вода
Коллоидные органические вещества	Грязь	Накипь: $\text{CaCO}_3$ $\text{CaSO}_4$ , $\text{MgSiO}_3$
Иловые наносы, грязь	Реакционноспособные газы – $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{SO}_2$ , $\text{NH}_3$	Продукты коррозии: $\text{Fe}_2\text{O}_3$
Растворимое железо		Утечки технологической жидкой среды – углеводороды, сульфиды
Бактериальное обсеменение	Бактериальное обсеменение	Микробные отложения

Синтетические полимеры, например, полиакрилаты или полиакриламиды широко применяются в качестве диспергирующих агентов для ликвидации иловых наносов, песка, железа, и других отложений неорганических соединений. Для извлечения максимальной пользы от диспергирующего агента в целях борьбы с конкретными источниками загрязнения такие полимеры могут быть сделаны на заказ, путем изменения их компонентов и молекулярного веса. Если

в системе имеет место выпадение в осадок карбоната и сульфата кальция, то наиболее оптимальными ингибиторами являются фосфор-органические соединения, включая сложные эфиры высокомолекулярного спирта и фосфонаты. Однако, если такой осадок уже сформировался, борьба с накипеобразованием при использовании этих диспергирующих агентов осуществляется очень медленно, так что в таких случаях, прежде всего, необходимо предотвратить образование накипи.

### **БОРЬБА С МИКРОБНОЙ АКТИВНОСТЬЮ**

---

О загрязнении систем микробными отложениями следует упомянуть отдельно. Для проведения химической обработки таких систем часто требуются биоциды для уничтожения микробных колоний и диспергирующие агенты для разрыхления таких отложений и их удаления из системы. Наиболее распространенный биоцид для любых систем - это хлор. В основном хлор представляет собой единственный биоцид, необходимый для химической обработки большинства систем. Если вводить хлор непрерывно в концентрации 0.2 - 0.4 ppm (частей на миллион), то он обеспечит эффективный контроль при любых значениях pH охлаждающей воды. При значениях pH, указывающих на наличие щелочной среды, постоянное присутствие хлора в системе создаст прекрасные условия для уничтожения бактерий вследствие постоянного контакта хлора с микробными массами. Если хлор подается в систему периодически, например в системах водяного охлаждения электростанций общего пользования, хлор контактирует с микробными массами в течение непродолжительных промежутков времени. В этом случае значение pH играет более важную роль. Изучение процессов стерилизации показали, что хлор уничтожает бактерии гораздо быстрее при pH = 7, чем при pH > 8. Это может объясняться тем, что при pH = 7 большая концентрация HOCl необходима для создания равновесия гипохлорита. Таким образом, хлорирование микробных масс в воде может проходить более эффективно при pH нейтральной среды, поскольку HOCl обладает более высокой поражающей способностью по сравнению с OCl<sup>-</sup>.

Однако, применение хлора связано с рядом проблем. Хлор может вступать в реакцию с некоторыми органическими веществами, в частности, с фенольными соединениями, образовывать продукты реакции, не являющиеся биоразлагаемыми, однако, являющиеся жаропрочными, что представляет потенциальную опасность формирования отложений в системе. Подводя итог, можно сказать, что хлор может использоваться для химической обработки большинства систем, не вызывая опасности вымывания лигнина из деревянных конструкций градирен, если концентрация свободного хлора не превышает 1 мг/л. В большинстве систем в очень редких случаях необходима непрерывная подача свободного хлора в систему в концентрации 0.2 - 0.3 мг/л для борьбы с микробной активностью. Обработка воды бромом часто является более эффективной по сравнению с ее обработкой хлором, т.к. такая обработка эффективна при более высоких значениях pH и исключает образование различных галогенизированных побочных продуктов, появление которых возможно при хлорировании.

Хотя хлор и бром - превосходные средства борьбы с микробами, их действие может быть значительно улучшено при использовании биологических диспергирующих агентов. Биологические диспергирующие агенты, разрывая биопленки, способствуют тому, чтобы токсическое вещество контактировало с большим количеством микробных организмов. В случае сильного загрязнения системы или прекращения подачи токсического вещества, может потребоваться неокисляющий биоцид (См. Часть 22).



---

## ГЛАВА 39

---

# ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

---

В настоящее время большая часть всего объема энергии, потребляемой в Соединенных Штатах Америки в промышленности, на транспорте, в жилых зданиях и торговых сооружениях, используется для производства пара путем сжигания ископаемого топлива. Наибольшая доля в производстве пара приходится на электростанции общего пользования, однако промышленные предприятия также производят пар в очень больших количествах; этот пар используется для технологических целей, при этом часто в качестве побочного продукта при помощи турбин осуществляется выработка электроэнергии (комбинированное производство тепловой и электрической энергии).

Обработка воды, используемой для производства пара - один из наиболее сложных разделов гидрохимии. Инженер-энергетик, ставящий перед собой задачу постоянного повышения КПД котлоагрегатов и оборудования, работающего на паре, должен хорошо знать основы химии котловой воды.

Качество воды, используемой для производства пара, зависит от давления и конструкции котла. Качество воды систем городского и заводского водоснабжения, используемой для хозяйственных целей, редко удовлетворяет требованиям, предъявляемым к качеству котловой воды. Подпиточная вода из таких источников почти всегда подвергается очистке с целью снижения содержания загрязняющих веществ до допустимого уровня; кроме того, состав очищенной воды корректируют путем ввода соответствующих химических добавок, для того чтобы исключить какие-либо неблагоприятные воздействия загрязняющих примесей, остающихся в воде в минимальных количествах. Во избежание трех основных проблем в системе питательных трубопроводов котла - возникновения отложений, коррозии и появления примесей в рециркуляционной воде - последовательность обработки воды должна быть определена в зависимости от вида и концентрации обнаруженных в водном источнике загрязняющих веществ, а также от требований, предъявляемых к качеству очистки воды.

---

### **ОТЛОЖЕНИЯ**

---

Когда состояние равновесия в воде, контактирующей с поверхностями оборудования, нарушается вследствие какого-либо внешнего воздействия, например, нагрева, на любой контактирующей с водой поверхности, в первую очередь, на трубах котлов, возможно образование отложений, в частности, накипи. Любое загрязняющее вещество характеризуется определенной растворимостью в воде и в случае превышения предела растворимости выпадает в осадок. Если вода находится в контакте с горячей поверхностью, а растворимость загрязняющего вещества при повышении температуры снижается, то происходит осаждение этого вещества на поверхность, что является причиной образования накипи. Образующиеся в котлах отложения чаще всего состоят из фосфата кальция, карбоната кальция (в котлах низкого давления), гидроксида магния, силиката магния, различных видов оксида железа, диоксида кремния, адсорбируемого на вышеуказанных отложениях, и оксида алюминия (см. Табл. 39.1). Если для обработки котловой воды используются соли фосфорной кислоты, то кальций будет осаждаться, в основном, в виде фосфата, а не карбоната, и, следовательно, отложения будут состоять главным образом из фосфата кальция.

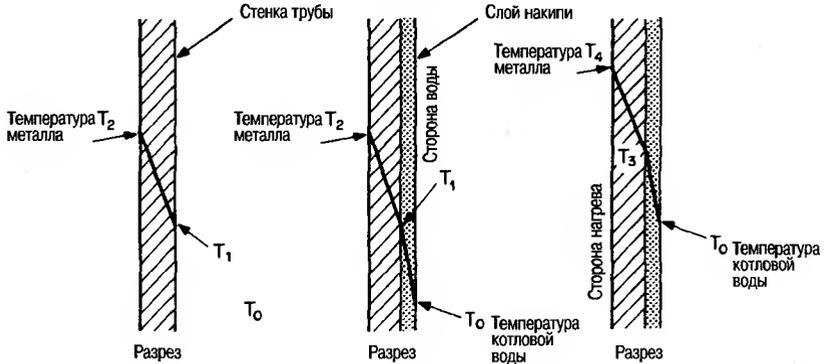
При высоких температурах, какие имеют место в котлах, отложения представляют собой серьезную проблему, которая становится причиной нарушения теплопередачи и может привести к разрушению труб котла. В котлах низкого давления с низким коэффициентом теплопередачи, образовавшиеся отложения могут полностью закупорить трубу котла.

**Таблица 39.1** Предполагаемый состав накипи в котлах

Составляющая	Обработка методом коагуляции	Остаточная обработка с применением $PO_4$
Карбонат кальция	Высокое содержание	Обычно менее 5 %
Фосфат кальция	Обычно менее 15 %	Высокое содержание
Силикат кальция	Обычно менее 3 %	Следы или отсутствует
Сульфат кальция	Отсутствует	Отсутствует
Гидроксид кальция	Отсутствует	Отсутствует
Потери при сгорании	Обычно менее 5 %	Обычно 8-12% или больше, если питательная вода имеет очень высокую степень очистки
Фосфат магния	Отсутствует	Обычно менее 5%; за исключением некоторых котлов высокого давления
Гидроксид магния	Умеренное содержание	Умеренное содержание
Силикат магния	Умеренное содержание	Умеренное содержание
Диоксид кремния	Обычно менее 10 %	Обычно менее 10 %
Оксид алюминия	Менее 10 %	Обычно менее 10 %
Масло	Отсутствует	Отсутствует
Оксид железа	Обычно менее 5 %	Обычно менее 5%, за исключением случаев, когда питательная вода имеет высокую степень очистки
Соли натрия	Обычно менее 1,5 %	Обычно менее 1,5 %
Медь	Следы	Обычно низкое содержание
Другие металлы	Следы	Низкое содержание

В современных котлах среднего и высокого давления с коэффициентами теплопередачи более 200.000 брит. тепл. ед. /кв. фут/час (5000 кал/м<sup>2</sup>/час) наличие даже очень тонкого слоя отложений приводит к значительному повышению температуры металла труб. Отложения замедляют передачу тепла топочных газов котловой воде. Это тепловое сопротивление приводит к быстрому повышению температуры металла до такого значения, при котором возможно разрушение. На Рис. 39.1 показано, что происходит при вспучивании труб в результате образования отложений. Для упрощения не показано падение температуры вследствие наличия воздушной подушки или тонкого слоя воды. Разрез А - это поперечный разрез металла трубы с поверхностью нагрева, на которой нет никаких отложений. В данном случае имеет место падение температуры через металл трубы: температура на наружной поверхности металлической трубы (T2) снижается до температуры металлической поверхности, находящейся в контакте с котловой водой (T1). Разрез В - это та же самая труба после образования теплоизоляционного слоя отложений. Помимо падения температуры с T2 до T1 из-за образовавшегося слоя отложений происходит дополнительное снижение температуры с T1 до T0. Разумеется, в таких условиях, температура котловой воды снижается до T0. Однако, температура котловой воды определяется рабочим давлением, и в соответствии с режимом работы температура котловой воды должна быть такой же как до образования слоя отложений. Разрез С - это состояние, которое фактически имеет место. Повышение температуры котловой воды от исходного значения T0 вследствие образовавшегося слоя накипи

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ



**Рис. 39.1** Профиль температур в поперечном сечении чистой трубы и трубы, имеющей отложение на стороне воды.

представлено линией от  $T_0$  до  $T_3$ . Дальнейшее повышение температуры через стенку трубы представлено линией от  $T_3$  до  $T_4$ . Температура наружной поверхности металла  $T_4$  теперь значительно выше температуры  $T_2$ , то есть температуры наружной поверхности металла до образования отложений на поверхностях трубы. Если процесс осаждения имеет место в течение длительного времени, что приводит к увеличению толщины теплоизоляционных отложений, температура металла трубы будет повышаться до тех пор, пока не превысит предельно допустимое значение. Обычно эта максимально допустимая температура составляет 900 - 1000°F (480 - 540°C). При более высоких коэффициентах теплопередачи и в котлах высокого давления эта проблема является более серьезной:



**Рис. 39.2** Обычная структура низкоуглеродистой котельной стали. Участки темного цвета — это чередующиеся пластинки цементита ( $Fe_3C$ ) и феррита; в целом именуемые перлитом; основу составляет феррит светлого цвета.

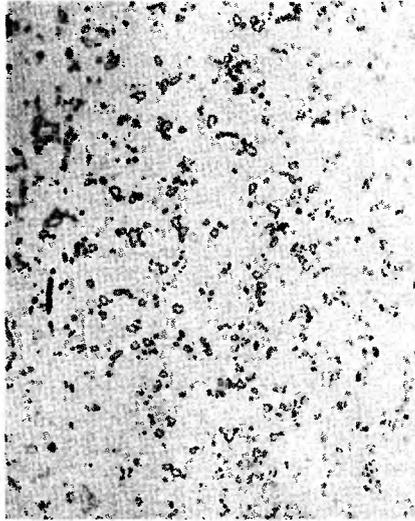


Рис. 39.3 При температуре выше 800°F начинается образование сферондов углерода и рост зерен.

при температурах от 900 до 1350°F (482 - 732°C) начинается разрушение углеродистой стали. На Рис. 39.2 показана обычная структура труб котла, изготовленных из углеродистой стали, а на Рис. 39.3 - сфероидизация углерода и последующие изменения структуры, которые происходят при температуре выше 800°F

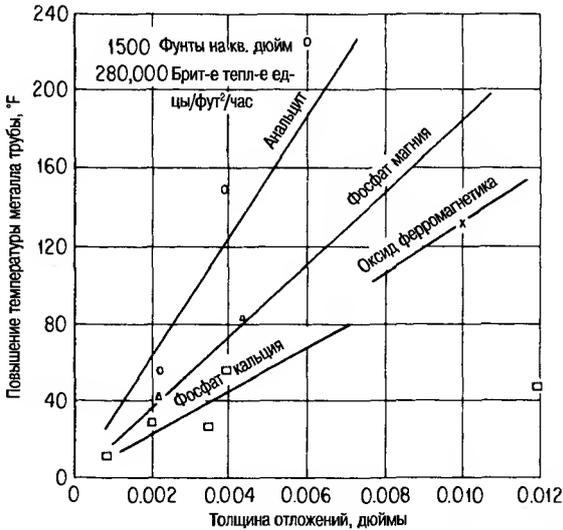


Рис. 39.4 Отложения на котельной трубе на стороне воды препятствуют охлаждению металла потоком воды. В этом случае возможен перегрев металла на стороне нагрева. (Публикация после адаптации из статьи: Jacklin C. "Deposits in Boilers"/"Отложения в котлах", Ind. Eng. Chem., май 1954.)

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ



Рис. 39.5 Типичный разрыв трубы вследствие перегрева

(427°C), что приводит к снижению прочности металла. Температура в топке котла значительно превышает эту критическую температуру. Циркулирующая по трубам вода обычно отводит тепло, не допуская нагрева металла до критической температуры. Отложения изолируют трубу, уменьшая возможную скорость отвода тепла (Рис. 39.4); это ведет к перегреву и, в конечном счете, к разрушению трубы (Рис. 39.5). Отложения могут иметь не очень большую толщину, для того чтобы стать причиной такого разрушения, но все же могут привести к снижению КПД и нарушению тепловой нагрузки при теплообмене в других частях котла.

Отложения могут представлять собой накипь, образующуюся на поверхности в месте нагрева, или ранее образовавшийся осадок химических веществ. Эти вещества осаждаются из воды в зонах с низкой скоростью, уплотняются до образования плотного агломерата, аналогичного накипи, но при этом сохраняют свойства первоначального осадка. При эксплуатации промышленных котлов порой лишь в редких случаях можно избежать образования осадка определенного вида. В оборотной котловой воде почти всегда в некотором количестве присутствуют макрочастицы, которые могут осаждаться в зонах с низкой скоростью, таких как грязевой коллектор. Исключение составляют лишь системы, в которых используется вода высокой степени чистоты, например, котлы электростанций общего пользования; в этих системах макрочастицы, в основном, отсутствуют, за исключением ситуаций, когда временно нарушается режим работы системы.

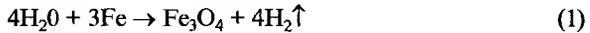
### **КОРРОЗИЯ**

Вторая большая проблема, которая возникает в котлах и имеет отношение к воде, - это коррозия; чаще всего коррозия стали, обусловленная различной концентрацией кислорода. Коррозия имеет место в системах водоснабжения, системах подготовки котловой воды, котлах, линиях возврата конденсата и практически в любой части парового цикла, где присутствует кислород. При высокой температуре и низкой величине pH коррозионный процесс в присутствии кислорода протекает с более высокой скоростью. Реже встречается щелочная коррозия, которая может возникнуть в котлах высокого давления, где вследствие наличия пористых отложений на отдельном участке образования пузырьков пара может иметь место высокая концентрация едкого натра.

Некоторые химические вещества, используемые для обработки питательной воды, например, хелаты, в случае неправильного применения могут вызвать коррозию трубопроводов питательной воды, регулирующей арматуры и даже внутрикорпусных устройств котла.

Хотя удаление кислорода из питательной воды котла является основной операцией в борьбе с коррозией в котлах, риск развития коррозии все еще остается. Примером может служить прямое агрессивное воздействие пара на сталь-

ную поверхность котла при высоких температурах; см. уравнение реакции, приведенное ниже:



Такая коррозия может возникать на тех поверхностях котла, где имеется паровая подушка и из-за ограниченного потока котловой воды происходит перегрев. Развитие коррозии возможно также в трубах пароперегревателя, подверженных перегреву. Так как в ходе коррозионной реакции образуется водород, в качестве прибора контроля коррозии можно применять устройство для анализа содержания водорода в паре, см. Рис. 39.6.

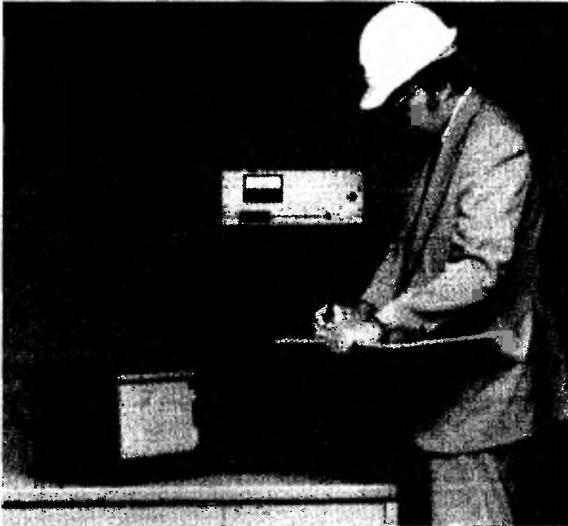


Рис. 39.6 Этот прибор применяется для анализа пара в целях контроля концентрации водорода, образовавшегося вследствие коррозии.

Третья серьезная проблема, возникающая при эксплуатации котла, - унос из котла в систему пара. Это может происходить в результате механического воздействия, например, при разбрызгивании котловой воды вокруг поврежденной перегородки; или вследствие того, что некоторые содержащиеся в котловой воде соли, например, соединения диоксида кремния и натрия, характеризуются летучестью; или вследствие пенообразования. Наиболее часто унос представляет собой проблему механического характера, и обнаруживаемые в паре химические вещества - это вещества, первоначально присутствовавшие в котловой воде, плюс летучие компоненты, которые отгоняются из котла даже без разбрызгивания.

Имеются три основных способа решения этих больших проблем:

1. Внешняя обработка. Обработка воды - подпиточной воды, конденсата или того и другого потока - до подачи в котел с целью уменьшения содержания или удаления химических веществ (например, для устранения жесткости или удаления диоксида кремния), газов или твердых веществ.
2. Внутренняя обработка. Обработка питательной воды котла, котловой воды, пара или конденсата соответствующими химическими веществами.

3. Частичный сброс оборотной воды. Регулирование концентрации химических веществ в котловой воде путем отвода части воды из котла.

### **ВНЕШНЯЯ ОБРАБОТКА**

Для того чтобы подача воды в систему котла соответствовала установленным требованиям, большую часть типовых химико-технологических операций по обработке воды (Табл. 39.2) можно проводить по отдельности или в комбинации с другими операциями. Эффективность процессов обработки оценивается по полученным результатам и затратам на обработку.

Программа обработки котловой воды рассчитана на устранение загрязняющих примесей, которые в целом подразделяют на семь классов: взвешенные твердые вещества; примеси, которыми обусловлена жесткость воды; примеси, определяющие щелочность воды; диоксид кремния, общее количество твердых растворенных веществ (TDS), органические вещества и газы. В Таблице 39.2 представлена информация об эффективности каждой из технологических операций, применяемых для обработки подпиточной воды котлов с целью уменьшения содержания или удаления вышеуказанных примесей, о чем уже говорилось в предыдущих главах.

#### **Взвешенные твердые вещества**

Удаление взвешенных твердых веществ осуществляется путем коагуляции и флокуляции, фильтрации или осаждения. Для других типовых процессов обработки, за исключением прямой реакции, обычно требуется предварительное удаление твердых веществ. Например, во избежание загрязнения ионита и возникновения технологических осложнений, содержание взвешенных твердых веществ в воде, подлежащей обработке с применением метода ионного обмена, не должно превышать 10 мг/л.

#### **Жесткость**

В Табл. 39.2 указаны несколько типовых химико-технологических операций для удаления из воды кальция и магния. В процессе обмена ионами натрия происходит только устранение жесткости; другие операции рассчитаны на решение не только этой задачи. На рис. 39.7 для сравнения представлены данные анализа воды после умягчения различными способами, подтверждающие возможность уменьшения содержания других загрязняющих примесей. В Табл. 39.3 указаны результаты, полученные при применении различных технологий умягчения воды.

#### **Щелочность**

Котловая вода в некоторой степени должна обладать щелочными свойствами, поэтому при обработке подпиточной воды котла редко проводится полное удаление компонентов, которыми обусловлена щелочность; исключение составляет лишь процесс деминерализации. Кроме того, щелочные свойства необходимы для обеспечения оптимальной величины рН питательной воды во избежание коррозии трубопроводов и оборудования.

Щелочные свойства подпиточной воды могут быть обусловлены присутствием  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  или  $\text{OH}^-$ . Если в качестве подпиточной воды используется вода из системы городского водоснабжения, умягчение которой проводится при помощи цеолитов, то она обычно характеризуется бикарбонатной щелочностью ( $\text{HCO}_3^-$ ); щелочность воды после умягчения известью в большинстве случаев обусловлена присутствием карбоната ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), а, возможно, и какого-





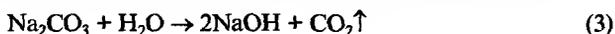


## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

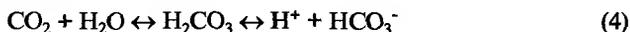
**Таблица 39.3** Сводные данные, полученные при использовании различных технологий умягчения воды  
(Сводные данные к Рис. 39.7)

Технология	Остаточное содержание, мг/л			Общее кол-во растворенных тверд. веществ
	Жесткость	Щелочность	Диоксид кремния	
Вода до обработки	160	135	10	275
Обмен ионами натрия	нуль	135	10	290
Обмен ионами натрия и кислота	нуль	20	10	290
Раздельные потоки	нуль	20	10	170
Частичное умягчение известью (при низкой t)	75	50	9	190
Обработка известью и цеолитом при высокой t	нуль	30	1	155

Далее происходит разложение карбоната натрия с образованием щелочи:



При конденсации пара углекислый газ повторно растворяется с образованием агрессивной угольной кислоты:



Количество образующегося  $\text{CO}_2$  пропорционально щелочности. При заданной щелочности количество  $\text{CO}_2$ , образующегося из  $\text{HCO}_3^-$  вдвое больше, чем из  $\text{CO}_3^{2-}$ , так как разложение бикарбоната происходит в обеих реакциях (2) и (3), уравнения которых приведены выше. Угольную кислоту обычно нейтрализуют при химической обработке пара - прямой или через котел, чтобы получить конденсат с величиной рН в пределах 8,5 - 9,0. Затем желательнее уменьшить щелочность питательной воды, чтобы свести к минимуму образование  $\text{CO}_2$  и снизить затраты на химическую обработку.

Гидроксид, образующийся при разложении  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ , способствует осаждению магния, обеспечивая хорошие условия для доведения осадка до необходимого состояния и минимизируя унос  $\text{SiO}_2$  в новый цикл. Однако, при слишком большом избытке щелочи возможно развитие коррозии, особенно, в случае возникновения местной концентрации. Происходит полное разложение  $\text{HCO}_3^-$ , но не полное превращение  $\text{CO}_3^{2-}$  в щелочь. Степень превращения в разных котлах неодинаковая и увеличивается при повышении температуры. Как правило, при давлении 600 фунтов/кв. дюйм щелочность котловой воды на 65-85% обусловлена присутствием  $\text{NaOH}$ , остаток приходится на  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . (Эти данные получены путем анализа охлажденной пробы котловой воды, характеризующейся равновесным состоянием.)

Следовательно, степень уменьшения щелочности определяется допустимыми пределами для котловой воды и заданным качеством пара. При выборе оптимальной технологии можно не только обеспечить заданное уменьшение щелочности, но и решить ряд других проблем. На Рис. 39.8 представлены данные анализов воды, на основе которых можно сравнить эффективность различных способов уменьшения щелочности и их дополнительные преимущества. Основные различия между этими способами показаны в Табл. 39.4, где приведены сводные данные анализов воды.



## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

**Таблица 39.4** Сводные данные, полученные при использовании различных технологий уменьшения щелочности воды  
(Сводные данные к Рис. 39.7)

Технология	Остаточное содержание, мг/л			Общее кол-во растворенных тверд. веществ
	Жесткость	Щелочность	Диоксид кремния	
Вода до обработки	135	160	10	275
Прямое добавление кислоты	20	160	10	290
Раздельные потоки	20	нужь	10	170
Na <sub>2</sub> X и анион (Cl)	20	нужь	10	290
Обработка известью при низкой t	50	75	9	190
Обработка известью ицеолитом при высокой t	30	нужь	1	155

ционной турбины. В котлах низкого давления, где проводится обработка фосфатом, при низких концентрациях диоксида кремния иногда возможно образование липкого осадка. Можно выбрать такую технологию обработки подпиточной воды, которая обеспечит снижение содержания диоксида кремния только до уровня, требуемого для работы паровой системы. На Рис. 39.9 представлены результаты обработки, полученные при использовании разных технологий удаления диоксида кремния; сводные данные, характеризующие эффективность этих технологий в отношении других загрязняющих примесей в питательной воде, представлены в Таблице 39.6.

**Таблица 39.5** Концентрация диоксида кремния в котловой воде

Давление в барабане котла, Фунты/кв. дюйм изб.	Концентрация диоксида кремния, мг/л	
	Рекомендуемое*	Для получения концентрации 0,02 мг/л †
0 - 300	150	150
301 - 450	90	90
451 - 600	40	55
601 - 750	30	35
751 - 900	20	20
901 - 1000	8	15

\* Рекомендуемые пределы. Согласованы на основе накопленного опыта регулирования качества питательной и котловой воды при эксплуатации современных промышленных котлов (ASME, 1979).

† Для насыщенного пара с верхним предельным давлением

### Общее количество твердых растворенных веществ

При использовании некоторых технологий обработки воды количество твердых растворенных веществ в ней может увеличиться за счет растворимых побочных продуктов; при умягчении воды цеолитом в натриевой форме количество твердых веществ увеличивается за счет добавления иона (натрия), эквивалентный вес которого (23) выше, чем у кальция (20) или магния (12,2), удаляемых из неочищенной воды. Результаты, получаемые при использовании различных технологий уменьшения содержания растворенных твердых веществ,

«NALCO»: КНИГА О ВОДЕ

Условные обозначения методов обработки воды, данные анализа которой указаны в представленной ниже таблице							
A. Сырая вода		D. Известково-содовое умягчение при 220°F					
B. Умягчение известью с FeCl <sub>3</sub> при низкой t		E. Na <sub>2</sub> Z + A.OH + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					
C. Известково-содовое умягчение при низкой t		F. Деминерализация					
Компоненты	В пересч. на	A	B	C	D	E	F
Кальций	CaCO <sub>3</sub>	115	70	35	15	нуль	нуль
Магний	"	45	40	30	2	нуль	нуль
Натрий	"	60	60	85	108	220	1-2
Общее содержание электролита	CaCO <sub>3</sub>	220	170	150	125	220	1-2
Бикарбонат	CaCO <sub>3</sub>	135	0	0	0	0	1-2
Карбонат	"	0	35	35	30	20	0
Гидроксил	"	0	0	30	10	0	0
Сульфат	"	65	65	65	65	180	0
Хлорид	"	20	70	20	20	20	0
Нитрат	"	0	0	0	0	0	0
М-щелочность	CaCO <sub>3</sub>	135	35	65	40	20	1-2
Р-щелочность	"	0	18	48	25	10	0
Диоксид углерода		10	0	0	0	0	нуль
pH		7,3	10,0	10,8	10,3	10,0	7-8
Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	10	6	7-8	1	0,5-1	0,05
Железо	Fe	0	0	0	0	0	0
Мутность		нуль	нуль	нуль	нуль	нуль	нуль
Общее количество твердых растворенных веществ (оценоч. данные)		275	225	210	145	290	1-2
Цветность		0	0	0	0	0	0

Рис. 39.9 Сравнение данных анализа воды, полученных при уменьшении содержания диоксида кремния различными способами

неодинаковы. Уменьшение содержания твердых растворенных веществ обеспечивается путем снижения содержания ряда отдельных загрязняющих веществ. В Табл. 39.7 приведены сводные данные анализов воды после обработки с применением технологий уменьшения количества твердых растворенных веществ.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

**Таблица 39.6** Сводные данные, полученные при снижении концентрации диоксида кремния с применением разных технологий  
(Сводные данные к Рис. 39.9)

Технология	Остаточное содержание, мг/л			
	Диоксид кремния	Жесткость	Щелочность	Общее кол-во растворенных тверд. веществ
Вода до обработки	10	160	135	275
Обработка известью и солями железа при низкой t	6	110	35	225
Известково-содовое умягчение при низкой t	7-8	65	65	210
Известково-содовое умягчение при высокой t	1	17	40	145
Na2X и анионит	1	нуль	20	290
Деминерализация	0,05	нуль	1-2	1-2

**Таблица 39.7** Уменьшение общего количества твердых растворенных веществ  
(Сводные данные к Табл. 39.3, 39.4 и 39.6)

Технология	Остаточное содержание, мг/л			
	Общее кол-во растворенных тверд. веществ	Жесткость	Щелочность	Диоксид кремния
Вода до обработки	275	160	135	10
Раздельные потоки	170	нуль	20	10
Частичное умягчение известью при низкой t	190	75	50	9
Известково-содовое умягчение при высок. t	145	17	40	1
Обработка известью ицеолитом при высок. t	155	нуль	30	1
Деминерализация	1-2	нуль	1-2	0,05

### Органические вещества

В общей классификации веществ понятие органического вещества - это лишь качественное понятие. Оно включает большое многообразие соединений, которые редко анализируют в виде отдельных веществ. Проблемы в системах котлов вследствие присутствия в воде органических веществ часто возникают из-за содержания органических веществ в возвратном конденсате, что обусловлено технологическим процессом, а не содержанием загрязняющих веществ в подпиточной воде. Однако, в системах высокого давления электростанций общего пользования органические вещества являются основными загрязняющими веществами в подпиточной воде и могут стать причиной образования органических кислот.

### Растворенные газы

Для удаления газов механическим, а не химическим способом обычно применяют дегазаторы. Для удаления CO<sub>2</sub> при температурах окружающей среды после

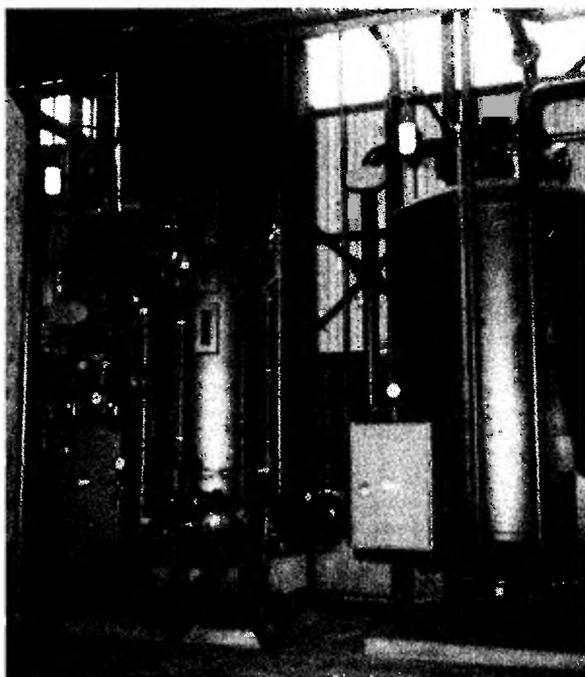
устройств для обработки кислотой или катионитами в водородной форме используются воздуходувки разных типов. Вакуумные дегазаторы обеспечивают ту же степень удаления  $\text{CO}_2$  и, кроме того, уменьшение концентрации  $\text{O}_2$  до  $<0,5-1,0$  мг/л, что способствует защите от коррозии, в первую очередь, в тех случаях, когда вакуумный дегазатор является частью системы деминерализации. После обработки в паровых дегазаторах, так называемых деаэрирующих подогревателях, вода обычно не содержит  $\text{CO}_2$  и имеет концентрацию  $\text{O}_2$  в пределах  $0,005 - 0,01$  мг/л. В результате прямой реакции остаточного кислорода, присутствующего в такой низкой концентрации, с катализированным сульфитом, гидразином или заменителями гидразина (летучие соединения, уменьшающие содержание кислорода) происходит полное удаление  $\text{O}_2$ ; благодаря этому удается предотвратить коррозию в системе до подачи в котел.

## **ВОЗВРАТ КОНДЕНСАТА**

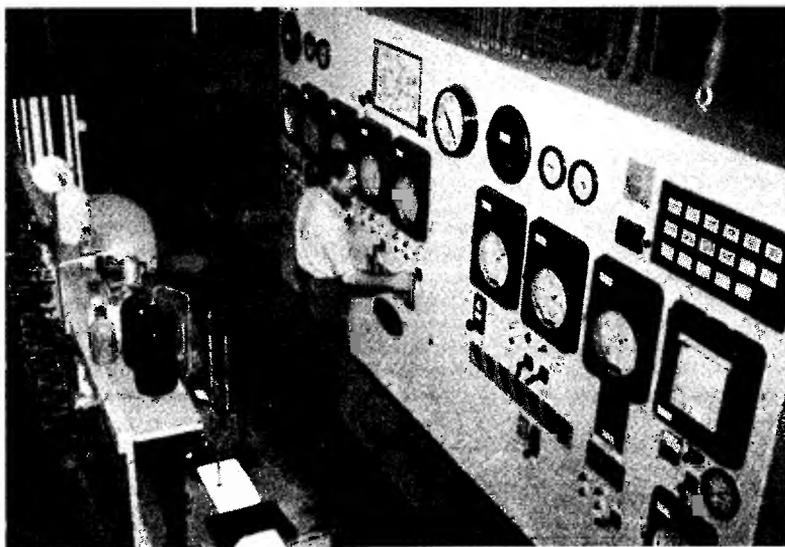
Для защиты системы котла, в целях обеспечения допустимого качества питательной воды, помимо обработки подпиточной воды может потребоваться очистка конденсата, особенно, если технологический конденсат содержит масло. Если для работы котлов требуется деминерализованная вода высокого качества, то и конденсат тоже должен быть высокого качества. На некоторых предприятиях работают котлы двух типов: высокого и низкого давления; установка деминерализатора полностью обеспечит высокое качество питательной воды для котлов высокого давления, при этом конденсат более низкого качества отделяется для возврата в котлы низкого давления.

Для очистки маслянистого конденсата обычно применяют мембранные фильтры. В качестве намывного фильтрующего слоя и загрузки фильтра применяется вспомогательный материал типа целлюлозы (обработанная древесная масса). Во избежание разрушения вспомогательного материала для образования фильтрующего слоя температура не должна превышать  $200^\circ\text{F}$  ( $93^\circ\text{C}$ ). Хорошей фильтрующей способностью отличаются также фильтры с антрацитовою загрузкой, с намывным слоем из хлопьев, образовавшихся из квасцов и алюмината натрия. Однако, во избежание растворения флокул окиси алюминия, величина pH конденсата должна быть равна 7 - 8. Конденсат, загрязненный продуктами коррозии и просочившейся жесткой водой, очищают, пропуская его через специальные катиониты в натриевой форме с высокой объемной скоростью потока (см. Рис. 39.10). Такие катиониты применяются для обработки конденсата при температурах до  $300^\circ\text{F}$  ( $149^\circ\text{C}$ ). Единственным серьезным недостатком простого катионита в натриевой форме является его способность захватывать нейтрализующие амины, например, морфолин (который присутствует в конденсате в виде бикарбоната морфолина), и обменивать их на натрий. Это приводит к значительному увеличению расхода аминов; однако более серьезная проблема возникает при возврате конденсата в котел высокого давления, где присутствие натрия может быть нежелательным из-за ухудшения качества пара. В таких случаях может появиться необходимость в проведении специальных операций по регенерации.

Особую проблему представляет собой использование в качестве питательной воды котлов сильно загрязненных конденсатов технологических процессов, например, конденсатов, образующихся на заводах, производящих крафт-целлюлозу, и нефтеперерабатывающих заводах. Как правило, они не имеют постоянного состава и могут содержать комплексные органические соединения и редко встречающиеся ионы, такие как ионы цианида, тиоцианата и сульфида. Программу обработки не следует составлять только на основе анализа конденсата; может потребоваться проведение исследований в лаборатории и на опытной установке, но возврат конденсата окупает все расходы, обеспечивая экономии тепла и снижение затрат на подпитку и химикаты для обработки воды.



(a)



(b)

**Рис. 39.10** Система ионного обмена, предназначенная для очистки конденсата, получаемого на химической установке: (a) ионообменники; (б) пульт управления. (Публикация с разрешения Dow Chemical Company.)

## **ВНУТРЕННЯЯ ОБРАБОТКА**

Для предотвращения накипеобразования в котле может быть использована одна из четырех программ обработки химическими веществами: коагуляция (карбонат), обработка остаточным фосфатом, хелатообразование или координированная программа применения фосфатов.

### **Программа обработки методом коагуляции**

При использовании этой технологии в котловую воду для повышения щелочности, которая обусловлена подпиткой неумягченной водой, добавляют карбонат натрия, гидроксид натрия или оба эти вещества. Карбонат добавляют с целью осаждения карбоната кальция при благоприятных, контролируемых условиях, для того чтобы не допустить его осаждения в виде накипи где-либо в другом месте. В щелочных средах также происходит осаждение магния и диоксида кремния в виде гидроксида магния и силиката магния. Котловая вода обычно отличается достаточно высокой концентрацией твердых взвешенных веществ и осаждение происходит на эти твердые частицы. Такой метод обработки применяется только для котлов (обычно для жаротрубных котлов), работающих под давлением не более 250 фунтов/кв. дюйм (17 бар); питательная вода этих котлов имеет высокую жесткость. Такой способ обработки должен применяться в сочетании с кондиционирующей добавкой для улучшения осадкообразования. Даже при использовании кондиционирующей добавки образование отложений затрудняет теплопередачу и приводит к увеличению объемов частичного сброса оборотной воды из-за высокой концентрации в ней твердых взвешенных веществ. Программы обработки методом коагуляции постепенно становятся ненужными, так как все более широкое применение находят системы предварительной обработки, требующие меньших затрат по сравнению с высокими затратами на внутреннюю обработку.

### **Программа обработки фосфатами**

Если давление в котле превышает 250 фунтов/кв. дюйм, то высокая степень уплотнения осадка нежелательна. В таких котлах жесткость питательной воды должна быть не более 60 мг/л и рекомендуется проводить обработку фосфатами. Кроме того, обработка фосфатами обычно проводится и для котлов, где давление не превышает 250 фунт/ кв. дюйм, а для подпитки используется мягкая вода.

Фосфат натрия добавляют или в питательную воду котла, или в барабан котла (это зависит от данных анализа воды и наличия вспомогательного оборудования в системе до котла) с целью образования нерастворимого осадка, в первую очередь, гидроксиапатита,  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ . Магний и диоксид кремния осаждаются в виде гидроксида магния, силиката магния (часто в виде соединения  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) или силиката кальция. Щелочность подпиточной воды обычно является достаточной для образования  $\text{OH}^-$ , необходимого для осаждения магния. При реализации программ обработки остаточным фосфатом повышается концентрация твердых взвешенных веществ и поэтому для улучшения осадкообразования необходимо добавлять кондиционеры/диспергаторы. Поскольку при осуществлении этих программ образуются отложения солей кальция и магния, ограничивающие теплопередачу, вместо обработки с целью осаждения часто проводят обработку с целью придания растворимости, используя для этого хелатообразующие агенты и полимеры/диспергаторы.

### **Программы обработки с применением хелатообразователей**

Хелат представляет собой молекулу, подобную ионообменнику; он имеет низкий молекулярный вес и растворим в воде. Хелатообразующими агентами, ко-

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

торые наиболее широко применяются для внутренней обработки в котлах являются натриевые соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (EDTA) и нитрилотриацетной кислоты (NTA). Они образуют хелатные соединения кальция и магния (образуют с кальцием и магнием комплексные ионы). Так как образующееся комплексное соединение растворимо в воде, преимущество такой технологии обработки заключается в том, что она обеспечивает минимальный частичный сброс оборотной воды. Вследствие высоких затрат по сравнению с фосфатами, применение хелатообразователей для обработки питательной воды, не характеризующейся высокой жесткостью, обычно ограничено. Существует риск возникновения проблем борьбы с коррозией в результате разрушения органической молекулы при высоких температурах, поэтому программы обработки с использованием хелатообразующих агентов обычно применяются только для котлов, работающих под давлением не более 1500 фунтов/кв. дюйм (100 бар). Добавление полимеров в качестве средств борьбы с накипеобразованием, способствует повышению эффективности программ обработки с применением хелатообразователей.

Риск возникновения коррозии можно также уменьшить путем снижения дозировки хелатообразующего агента ниже теоретической потребности с целью исключить присутствие остаточного хелатообразователя в котловой воде.

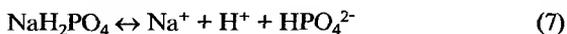
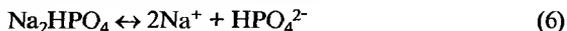
В котловой воде хелаты могут вступать в реакцию с кислородом, что может существенно увеличить затраты на реализацию программы обработки с применением хелатообразователей. Передозировка хелатообразователей и механизмы их концентрации в котле могут стать причиной развития сильной местной коррозии и последующего выхода из строя всего котлоагрегата.

### Координированная программа обработки фосфатами

В котлах с высоким давлением и высоким коэффициентом теплопередачи внутренней обработка должна обеспечивать очень низкое содержание твердых веществ в воде или их полное отсутствие. Риск коррозионного разрушения металла котла под действием щелочи возрастает с повышением давления, поэтому содержание в воде свободной щелочи должно быть минимальным. При таких режимах работы применяется координированная программа обработки фосфатами. Она отличается от обычной программы тем, что добавление фосфатов проводится с целью поддержания величины рН котловой воды в заданных пределах, а также, если это необходимо, для снижения жесткости котловой воды путем реакции с кальцием. Тринатрийфосфат гидролизуетсся с образованием ионов гидроксида:



Это невозможно при ионизации динатрийфосфата и мононатрийфосфата:



Обработку проводят с таким расчетом, чтобы в результате добавления смесей динатрийфосфата с тринатрийфосфатом или мононатрийфосфатом в разных пропорциях обеспечить оптимальную величину рН в отсутствие свободных ионов  $\text{OH}^-$ . Для успешного осуществления координированной программы обработки фосфатами питательная вода должна быть очень чистой и иметь соответствующее качество. Осуществление координированных программ обработки фосфатами не приводит к уменьшению осаждения; просто происходит осаждение менее прочно связанного фосфата кальция в отсутствие щелочи. Для улучшения структуры отложений необходимо добавление диспергирующего

агента, в противном случае они могут стать причиной снижения коэффициента теплопередачи. Координированная программа обработки фосфатами была разработана, в первую очередь, для обработки питательной воды котлов высокого давления электростанций общего пользования и опыт применения этой программы, в основном, накоплен в этой области. Более подробная информация о применении этой программы содержится в Главе 34, "Электростанции общего пользования".

## **КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ/ДИСПЕРГИРОВАНИЕ**

---

Новейшим усовершенствованием технологии внутренней обработки является использование синтетических органических полимеров для комплексообразования и диспергирования. Такая программа может применяться при обработке питательной воды котлов, работающих под давлением до 1500 фунтов/кв. дюйм (100 бар), и с минимальными затратами - во всех системах подачи питательной воды с низкой степенью жесткости, которая обычно имеет место после обработки путем ионного обмена. При этом получают максимальные коэффициенты теплопередачи, так как благодаря использованию полимеров обеспечивается максимальная чистота поверхностей труб; ни одна из имеющихся программ внутренней обработки не обеспечивает такую степень чистоты поверхностей. При такой обработке кальций магний и алюминий становятся растворимыми, а диоксид кремния остается в растворе, и в тоже время исключается побочное действие потенциала коррозии, обусловленного концентрацией водорода в паре. Аналогичным образом диспергируют макрочастицы железа, вновь поступающие из системы конденсата, с целью их удаления посредством частичного отвода воды. Критерием эффективности такой обработки в реальных условиях является перенос ионов.

## **ПРОГРАММА ПРИМЕНЕНИЯ ПРИСАДОК**

---

Внутренняя обработка проводится не только в целях борьбы с накипеобразованием и отложениями, но и во избежание уноса котловой воды в пар. Унос содержащихся в котловой воде солей в виде тумана впоследствии может привести к образованию отложений в пароперегревателе, что может стать причиной разрушения труб или образования отложений на лопатках турбины. Кроме того, не исключено попадание загрязняющих примесей в технологический процесс, где используется пар. Так как основной причиной уноса является пенообразование, эту проблему обычно решают путем добавления в питательную воду котла антипенных присадок.

Содержащийся в котловой воде ил может осаждаться, образуя отложения, которые могут представлять собой такую же серьезную проблему, как и накипь. Во избежание осаждения макрочастиц, содержащихся в котловой воде, и образования крупнозернистого осадка добавляют соответствующие химические вещества; мелкие частицы при тех скоростях потока воды, которые имеют место в контуре циркуляции котла, остаются в дисперсной фазе. При более низких давлениях в программах обработки методом коагуляции и остаточными фосфатами предусмотрено добавление специальных веществ для обработки ила с этой целью. Среди них - самые различные природные органические вещества, в том числе крахмал, танин и лигнин. На Рис. 39.11 показано прекращение роста кристаллов  $\text{CaCO}_3$  под действием танина; по Рис. 39.12 можно судить об эффективности танина в отношении предупреждения образования накипи  $\text{CaCO}_3$  в экспериментальных котлах, работающих под давлением 250 фунтов/кв. дюйм (17 бар), благодаря его способности останавливать рост кристаллов и диспергировать осажденный  $\text{CaCO}_3$ .

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

При средних давлениях широко используются подвергнутые химической обработке лигнины, хотя на смену им постепенно приходят синтетические полимеры. На Рис. 39.13 показана приблизительная конфигурация молекулы лигнина, прошедшего обработку для придания устойчивости к высоким температурам. На Рис. 39.14 и 39.15 показана его эффективность в борьбе с отложениями фосфата кальция и магнитного оксида железа в системах котлов, работающих под давлением 1500 фунтов/кв. дюйм (100 бар).

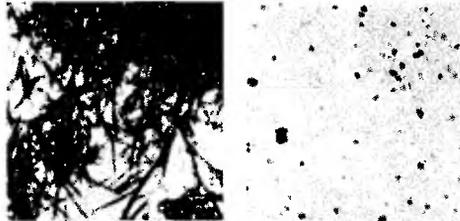


Рис. 39.11 Изменение характера кристаллов  $\text{CaCO}_3$  в результате обработки органическими веществами, в данном случае - танином.

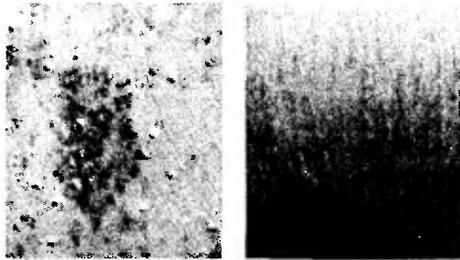


Рис. 39.12 В ходе ранних исследований, проводившихся в экспериментальных котлах, была точно определена роль танина в борьбе с отложениями на поверхностях котла.

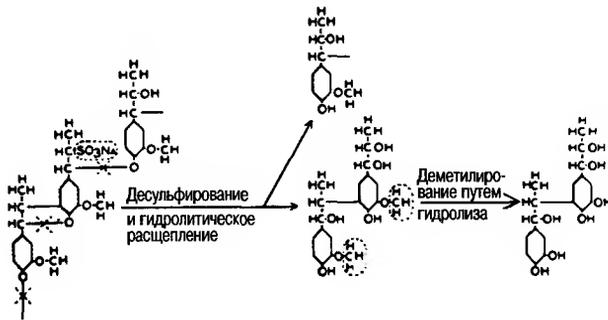
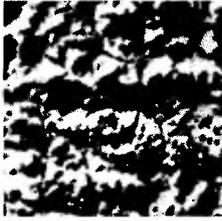
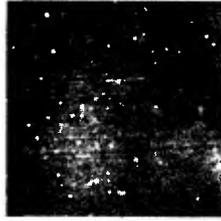


Рис. 39.13 Так как эффективность танина при высоких температурах снижается, была изучена возможность использования других органических веществ. На рисунке представлена структура лигнина, подвергнутого обработке с целью использования для борьбы с отложениями в котлах высокого давления.

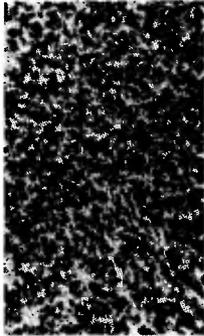


Давление 1500 фунтов/кв. дюйм; отложения фосфата кальция



Давление 1500 фунтов/кв. дюйм; добавка производных лигнина в концентрации 34 части на млн. (ppm)

**Рис. 39.14** На рисунке показана эффективность производных лигнина в борьбе с отложениями фосфата кальция при работе под давлением 1500 фунтов/кв. дюйм. Эффективность органических присадок для борьбы с накипеобразованием значительно повышается при использовании синтетических полимерных соединений.



Давление 1500 фунтов/кв. дюйм; отложения магнитного оксида железа



Давление 1500 фунтов/кв. дюйм; добавка производных лигнина в концентрации 34 части на млн. (ppm)

**Рис. 39.15** Эффективность производных лигнина в борьбе с отложениями железа при работе под давлением 1500 фунтов/кв. дюйм. (Слева) - Без обработки; (справа) - При обработке органическими веществами.

При работе под давлением до 1800 фунтов/кв. дюйм (120 бар) эффективными диспергирующими агентами являются такие теплостойкие полимеры как анионные карбоксилсодержащие соединения и их производные. В щелочной среде их эффективность повышается. Эти более эффективные синтетические органические полимеры постепенно вытесняют диспергаторы на основе лигнина и другие производные природных органических соединений. Молекулы таких диспергаторов предназначены для решения конкретных задач в области диспергирования разного рода отложений - силиката магнезии, фосфата кальция и макрочастиц железа.

Унос, приводящий к ухудшению качества пара, до некоторой степени возможен и при удалении загрязняющих примесей, которые в условиях эксплуатации котла могут улетучиваться. Основными летучими веществами являются  $\text{CO}_2$ , выделяющийся при разложении карбоната и бикарбоната, о котором го-

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

ворилось выше, и  $\text{SiO}_2$ . Несмотря на возможность нейтрализации  $\text{CO}_2$ , рекомендуется снижение щелочности питательной воды, чтобы свести его выделение к минимуму. Независимо от решаемой на практике задачи, избежать чрезмерного выброса  $\text{SiO}_2$ , обеспечив тем самым защиту лопаток турбины, можно только путем внешней обработки с целью уменьшения содержания диоксида кремния и путем частичного сброса оборотной воды. Щелочная, обусловленная присутствием гидроксила, способствует снижению летучести диоксида кремния.

Главной причиной коррозии системы котла является кислород. В системе до котла концентрацию кислорода снижают путем деаэрации, однако, таким способом невозможно обеспечить его полное удаление. Для удаления остаточного  $\text{O}_2$  и поддержания в котловой воде восстановительных условий после деаэрации проводят обработку сульфитами, гидразином или аналогичными гидразину (летучими) соединениями. Преимущество гидразина состоит в том, что его сбрасывают в пар, для того чтобы обеспечить его присутствие в конденсате с целью защиты системы циркуляции от коррозии, обусловленной присутствием кислорода. В присутствии кислорода аммиак может вызывать коррозионные разрушения медных сплавов в конденсаторах и ступенчатых подогревателях. Может появиться необходимость удаления  $\text{NH}_3$  путем внешней обработки. Об агрессивном действии  $\text{CO}_2$  уже говорилось выше, когда рассматривались системы конденсата. Кроме того, ранее уже были рассмотрены положительная и отрицательная роль  $\text{NaOH}$  в борьбе с коррозией в контуре циркуляции котла.

### **ЧАСТИЧНЫЙ СБРОС ОБОРОТНОЙ ВОДЫ**

---

Питательная вода котла, независимо от способа обработки подпиточной воды, все еще содержит загрязняющие примеси в измеримых концентрациях. На некоторых установках содержание примесей в питательной воде увеличивается за счет возврата загрязненного конденсата. Кроме того, концентрация твердых веществ в котловой воде повышается при внутренней обработке котловой воды химическими веществами.

При производстве пара из котла выпускается, в основном, чистый водяной пар, а твердые вещества, содержащиеся в питательной воде, остаются в контуре циркуляции котла. В результате непрерывного поступления примесей и отвода чистого водяного пара происходит постоянное повышение концентрации растворенных твердых веществ в котловой воде. Для каждого компонента в составе котловой воды определена предельно допустимая концентрация. Во избежание превышения этих предельно допустимых концентраций часть котловой воды отводят и сбрасывают в виде сточных вод. На Рис. 39.16 представлен баланс твердого стока котла, из которого следует, что частичный сброс воды должен быть отрегулирован таким образом, чтобы количество твердых веществ в сбрасываемой из котла воде было равно количеству твердых веществ в воде, поступающей в котел, и их концентрация постоянно поддерживается в заданных пределах.

Нет никаких сомнений в том, что значительные потери тепловой энергии при сбросе воды, являются основным фактором, снижающим КПД котла, поэтому при эксплуатации любой паросиловой установки ставится задача минимизации частичного сброса воды. Ниже в этой главе будут рассмотрены существующие способы утилизации этого тепла.

С одной стороны, частичный сброс котловой воды можно рассматривать как процесс снижения концентрации твердых веществ в котловой воде путем отвода котловой воды из системы в объеме, определяющем подачу питательной воды в котел в объеме, превышающем потребность в паре.

В каждой системе котла частичный сброс воды проводится в двух разных точках. В одной точке сброс воды осуществляется с целью регулирования концентрации растворенных твердых веществ в котловой воде или других показа-

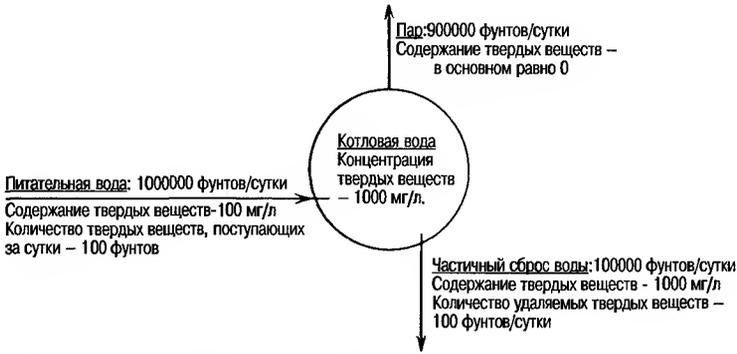


Рис. 39.16 Регулирование содержания твердых веществ в котловой воде путем частичного сброса воды.

телей. В другой точке сброс проводится периодически или по массе, обычно из грязевого коллектора или водораспределительных коллекторов; в этом случае периодический сброс осуществляется при работе котла с уменьшенной нагрузкой с целью удаления из котла осадков твердых веществ, образующихся в относительно застойных зонах. Ниже мы ограничимся рассмотрением проблемы частичного сброса котловой воды только с целью изменения концентрации растворенных твердых веществ в котловой воде.

Частичный сброс котловой воды может быть периодическим или непрерывным. При периодическом сбросе для конкретного котла с определенной величиной давления устанавливается предельно допустимая концентрация растворенных твердых веществ. При достижении этого предела для снижения концентрации примесей на короткий период времени открывается задвижка, а затем концентрация примесей в котле постепенно повышается, до тех пор пока снова не достигнет установленного предела. С другой стороны, при непрерывном частичном сбросе задвижка остается открытой и фиксируется в определенном положении, обеспечивающем сброс воды в постоянном объеме с целью поддержания относительно постоянной концентрации растворенных твердых веществ в котловой воде. Так как средний уровень концентрации при периодическом сбросе котловой воды существенно ниже того, который поддерживается при непрерывном сбросе, периодический сброс воды по сравнению с непрерывным менее эффективен и требует более высоких затрат.

На Рис. 39.17 представлена схема типичного промышленного котельного агрегата, из которого осуществляется отбор пара для турбины, при этом часть пара конденсируется в конденсаторе, а оставшаяся часть отбирается на технологические нужды, где могут иметь место потери пара или такая степень загрязнения конденсата, при которой требуется его удаление из системы.

Ниже приведены формулы для определения потерь при частичном сбросе, применительно к этой схеме:

$$M \times C_M = F \times C_F = B_1 \times C_{B1}$$

$$M + C + D = F = S + B \quad (\text{все значения в фунтах/час}) \quad (\text{или кг/час})$$

$$M = L + B_2 \quad (\text{все значения в фунтах/час}) \quad (\text{или кг/час})$$

$$CR_F = \frac{C_{B1}}{C_F} = \frac{F}{B_1} \quad CR_M = \frac{C_{B1}}{C_M} = \frac{M}{B_1}$$

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

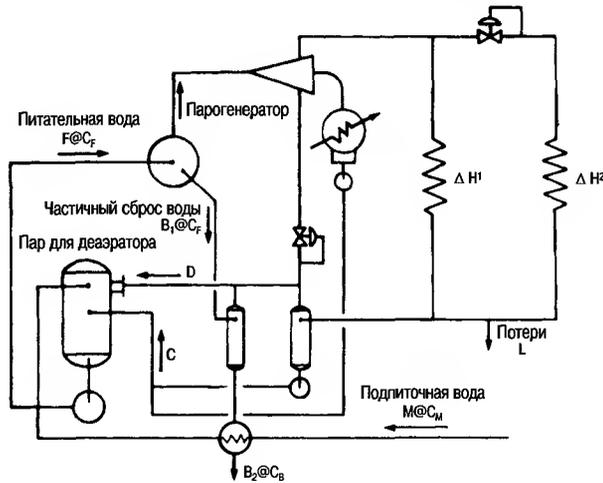


Рис. 39. 17 Схема промышленного котельного агрегата.

$$F = S \times \frac{CR_F}{(CR_F - 1)}$$

$$B_1 = F/CR_F$$

$$\text{Объем частичного сброса, \%} = \frac{100}{CR}$$

- Где:  $B_1$  = объем частичного сброса котловой воды с концентрацией твердых веществ  $C_{B1}$  мг/л  
 $B_2$  = объем сброса воды из испарителя  
 $CR$  = соотношение концентраций примесей;  $CR_F$  - соотношение концентраций примесей в расчете на питательную воду;  $CRM$  - в расчете на подпиточную воду  
 $C$  = объем возвратного конденсата при условии отсутствия в нем твердых веществ  
 $D$  = расход пара на деаэрацию  
 $F$  = расход питательной воды с концентрацией твердых веществ  $C_F$  мг/л  
 $L$  = потери пара или конденсата  
 $M$  = расход подпиточной воды с концентрацией твердых веществ  $C_M$  мг/л  
 $S$  = расход пара

Объем частичного сброса воды принято выражать в процентах от объема поступающей питательной воды. Однако, в этом случае у инженера-энергетика может сложиться неправильное представление о надежности. Если на электростанции объем возвратного конденсата составляет 80%, а подпиточной воды - 20%, то сброс воды в объеме 5% может показаться достаточным, но это означает только 4-кратное повышение концентрации подпиточной воды - из четырех единиц объема подпиточной воды, поступающей в котел, одна единица объема сбрасывается. Может быть, это максимально возможный объем использования подпиточной воды такого качества, но оператору это должно быть известно.

Поскольку основная задача регулирования частичного сброса состоит в том, чтобы для обеспечения максимального КПД котла получить максимально допустимые значения концентрации, в то же время не превышая тех значений, которые могли бы стать причиной нарушения работы системы, то при разработке программы регулирования частичного сброса в первую очередь следует определить предельно допустимые значения. В Таблицах 39.8 и 39.9 указаны обычно рекомендуемые предельно допустимые значения, при которых обеспечивается чистота котла и соответствующее качество пара. Эти предельно допустимые значения учитывают почти все ситуации, которые могут иметь место при эксплуатации промышленных котлов, однако не учитывают обработку методом коагуляции, проводимую в котлах низкого давления. При обработке коагулянтами общее количество растворенных твердых веществ обычно не должно превышать 3500 мг/л и щелочность воды должна поддерживаться на соответствующем уровне, для того чтобы обеспечить концентрацию карбоната, необходимую для осаждения кальция, и концентрацию гидроксида, необходимую для осаждения магния. Эти значения могут быть определены только после согласования основных вопросов, касающихся системы обработки подпиточной воды.

**Таблица 39.8** Оптимальные предельно допустимые концентрации в котловой воде\*  
*Барабанные котлы, в которых используется умягченная (недеионизированная) питательная вода*

	Давление, фунты/кв. дюйм					
	150	300	600	900	1200	1500
Общее кол-во растворенных тверд. веществ (TDS, макс.)	4000	3500	3000	2000	500	300
Фосфат (в виде PO <sub>4</sub> ) †	30-60	30-60	20-40	15-20	10-15	5-10
Гидроксид (в виде CaCO <sub>3</sub> )	300-400	250-300	150-200	120-150	100-120	80-100
Сульфит	30-60	30-40	20-30	15-20	10-15	5-10
Диоксидкремния (в виде SiO <sub>2</sub> ) макс. ‡	100	50	30	10	5	3
Общее содержание железа (в виде Fe) макс.	10	5	3	2	2	1
Органические вещества	70-100	70-100	70-100	50-70	50-70	50-70

\* Выделение теплоты не превышает 150000 британских тепловых единиц/час/кв. фут

† Там, где это целесообразно, вместо фосфатов могут быть использованы хелатообразующие агенты (этилендиаминтетрауксусная кислота или нитрилотриацетная кислота), обеспечивающие растворение, а не осаждение компонентов, которыми обусловлена жесткость воды. Иногда в программе предусмотрено использование и фосфатов, и хелатообразователей. Если требуется остаточное содержание хелатообразователей, то согласно рекомендациям их предельно допустимая концентрация в котловой воде должна составлять: (1) давление в котле не превышает 400 фунтов/ кв. дюйм, 4 - 8 мг/л; (2) 401 - 600 фунтов/кв. дюйм, 3 - 6 мг/л; (3) 601 - 1000 фунтов/кв. дюйм, 3 - 5 мг/л (во всех случаях остаточное содержание указано в виде CaCO<sub>3</sub>).

‡ Рекомендуемые значения предельно допустимой концентрации для котлов среднего давления см. Табл. 39.5.

Из табл. 39.8 и 39.9 следует, что предельные значения таких параметров, как общее количество растворенных твердых веществ, концентрация диоксида кремния и щелочность, в основном, зависят от количества этих веществ, поступающих с подпиточной водой; эти концентрации могут быть откорректированы посредством частичного отвода воды, а также путем внесения некоторых изменений в системе обработки подпиточной воды, если предусмотрена такая возможность. С другой стороны, такие компоненты, как фосфат, органические вещества и сульфит, вводятся как химикаты для внутренней обработки, и их концентрацию можно регулировать и посредством частичного сброса воды, и путем изменения расхода.

На примере системы котла, установленного на бумажной фабрике и работающего под давлением 900 фунтов/кв. дюйм (40 бар), можно показать, как сле-

Таблица 39.9 Оптимальные предельно допустимые концентрации в котловой воде\*  
 Котлы барабанного типа, в которых используется (деионизированная) питательная вода высшей степени очистки

	Давление, фунтов/кв. дюйм					
	До 600	900†	1200†	1500	1800	2400
Общие кол-во растворенных твердых веществ (макс.)	Оптимальные предельно допустимые концентрации такие же, как для мягкой (недеионизир.) питат. воды	500	300	200	100	50
Фосфат (в виде PO <sub>4</sub> )		15-25	15-25	5-10	5-10	5-10
РН		9,8 - 10,2	9,8 - 10,2	9,4 - 9,7	9,4 - 9,7	9,4 - 9,7
Диоксидкремния (в виде SiO <sub>2</sub> )		10	5	2	1	0,25
Общее содержание железа (в виде Fe)		2	2	1	0,5	0,2
Гидразин(в виде N <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )		0,04 - 0,06‡	0,04 - 0,06‡	0,04 - 0,06‡	0,04 - 0,06‡	0,04 - 0,06‡

\* Выделение теплоты - не более 150 000 Брит. тепл. ед./час/кв. фут.

† Для большей части котлов, установленных до 1950 г., и для установочных котлов, в которых еще при заданных режимах работы не была достигнута интенсивность теплопередачи через толочный экран, приводящая к кризису пузырькового кипения (DNB), предельно допустимые концентрации могут быть такими же, как при использовании умягченной (недеионизированной) питательной воды.

‡ Остаточное содержание гидразина в питательной воде только перед котлом, например, на входе экономайзера.

дует выполнять расчет объема частичного сброса котловой воды с целью регулирования концентраций. Пар направляется и к конденсационной паровой турбине, и к турбине с противодавлением, возврат конденсата составляет 50%. Обработка подпиточной воды проводится путем высокотемпературного процесса умягчения цеолитом и известью; после обработки общее количество растворенных твердых веществ в подпиточной воде составляет 150 мг/л, концентрация диоксида кремния - 3 мг/л, а общая щелочность - 20 мг/л. В табл. 39.10 показаны концентрации, полученные в этом примере.

Если концентрация диоксида кремния в питательной воде составляет 1,5 мг/л, а предельно допустимое значение в котловой воде - 10 мг/л, то концентрация диоксида кремния является регулирующим параметром и устанавливает соотношение концентраций (рассчитанное для питательной воды) = 6.7. Так как концентрация в воде может быть повышена до 10 в расчете на общее количество растворенных твердых веществ, то появляется необходимость в дополнительном уменьшении концентрации диоксида кремния на установке для высокотемпературного процесса умягчения. Если добавление доломитовой извести обеспечит снижение концентрации в подпиточной воде с указанных 3 мг/л до менее чем 2 мг/л, то объем частичного сброса воды можно было бы уменьшить с 15 до 10 %.

**Таблица 39.10** Сводная таблица предельно допустимых концентраций  
(Все значения концентраций указаны в мг/л)

Параметр	Подпиточная вода	Питательная вода	Предельно допустимые значения для котла*	Макс. CR <sub>F</sub> (соотношение концентраций)
Общее кол-во растворенных твердых веществ	150	75	2000	26,7
SiO <sub>2</sub>	3	1,5	6,7	
Щелочность	20	10	150†	15

\* Из таблицы 39.8.

† Если предположить, что щелочные свойства котловой воды на 90% обусловлены присутствием гидроксида, то средняя гидроксильная щелочность 135 мг/л (Табл. 39.8) соответствует средней общей щелочности 150 мг/л. Так как регулирующим параметром является диоксид кремния, объем частичного сброса воды составит:

$$\text{Объем частичного сброса воды} = \frac{100}{CR_F} = 15\% \text{ питательной воды}$$

Во втором примере рассмотрено применение простой установки для умягчения воды цеолитом в натриевой форме при обработке воды из системы городского водоснабжения с целью использования ее в качестве подпиточной воды для котла давлением 300 фунтов/кв. дюйм. Данные анализа воды, приведенные в таблице Рис. 39.18, отражают результаты обработки воды системы городского водоснабжения на установке для цеолитового умягчения и допустимые концентрации в котле с давлением 300 фунтов/кв. дюйм (20 бар). Соотношение концентраций (CR) рассчитывают для каждого из компонентов, концентрацию которого следует контролировать; по минимальному CR определяют объем частичного сброса воды. В этом примере минимальное соотношение составляет 2,5 и относится к щелочности. Следовательно, объем частичного сброса воды, регулируемый щелочностью, составил бы:

$$\text{Объем частичного сброса воды, \%} = \frac{100}{2,5} = 40\%$$

Это - большая потеря от частичного сброса воды, выраженная в процентах от объема подпитки. Однако, эту простую и не требующую высоких затрат тех-



«NALCO»: КНИГА О ВОДЕ

Условные обозначения методов обработки воды, данные анализа которой указаны в представленной ниже таблице

A. Вода из системы городского водоснабжения D. Пред. доп. конц-ии в котле @ 300 фунт./дюйм<sup>2</sup>  
 B. Na<sub>2</sub>Z + кислота + дегазатор E. CR для "B" @ 300 фунтов/дюйм<sup>2</sup>  
 C. Обработка в отдельных потоках + дегазатор F. CR для "C" @ 300 фунтов/дюйм<sup>2</sup>

Компоненты	В пересч. на	A	B	C	D	E	F
Кальций	CaCO <sub>3</sub>	75	нуль	нуль			
Магний	"	45	нуль	нуль			
Натрий	"	20	140	55			
Общее содержание электролита	CaCO <sub>3</sub>	140	140	55			
Бикарбонат	CaCO <sub>3</sub>	100	20	15			
Карбонат	"	0	0	0			
Гидроксил	"	0	0	0	225		
Сульфат	"	10	90	10			
Хлорид	"	30	30	30			
Нитрат	"	0	0	0			
М-щелочность	CaCO <sub>3</sub>	100	20	15	250	12,5	16,7
Р щелочность	"	следы	0	0	238		
Диоксид углерода		следы	0	5			
pH		8,2	7,0	6,6			
Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	3	3	3	50	16,7	16,7
Железо	Fe	0	0	0			
Мутность		0	0	0			
Общее количество твердых растворенных веществ		160	160	75	2000	12,5	26,6
Цветность		0	0	0			

Рис. 39.19 Снижение щелочности для уменьшения объема частичного сброса

Были рассмотрены два способа модификации системы умягчения цеолитом в натриевой форме с целью снижения щелочности. Данные, полученные при использовании этих двух способов - цеолит в натриевой форме плюс кислота и обработка в отдельных потоках - представлены на Рис. 39.19. В обоих случаях имеет место существенное снижение щелочности и объема частичного сброса воды. В первом варианте критическое соотношение концентраций CR увеличи-

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

вается до 12,5, таким образом, частичный сброс воды определялся бы щелочностью почти при оптимальном общем количестве растворенных твердых веществ (TDS). Дальнейшее уменьшение объема частичного сброса воды обеспечивается при обработке в раздельных потоках, так как TDS уменьшается так же, как и щелочность. При таких низких концентрациях, если объем частичного сброса составляет 6% от объема подпитки, регулирующим параметром становится концентрация диоксида кремния. Чтобы определить, целесообразно ли уменьшение объема частичного сброса воды с 8% при использовании первой технологии до 6%, которые можно получить при обработке в раздельных потоках, необходимо определить капитальные и эксплуатационные затраты. При использовании технологии обработки в раздельных потоках требуются более высокие затраты и возникает еще одна проблема - утилизация отработанной регенерирующей кислоты.

Эти примеры показывают, что соотношения концентраций примесей определяются путем химических анализов. Так как объем частичного сброса воды никогда не измеряют, а в большинстве случаев на электростанциях измеряют объем подпиточной и питательной воды, а также объем пара, то определение соотношений концентраций примесей путем химического анализа - это наиболее точный метод определения потерь от частичного сброса воды. Очевидно, что для правильного регулирования частичного сброса воды и определения объема частичного сброса необходим тщательный отбор проб питательной и подпиточной воды. Перед проведением анализа котловую воду следует охладить, утечки в охладителе могут стать причиной изменения состава котловой воды. Отбор проб котловой воды обычно осуществляется из коллектора для частичного сброса воды из барабана котла, и в случае неправильного конструктивного решения проба воды, направляемой на сброс, может оказаться непредставительной. Например, в трубопроводе для частичного сброса возможно скопление пузырьков пара, который затем конденсируется в охладителе проб и разбавляет котловую воду.

Несмотря на то, что требуемый объем частичного сброса котловой воды можно определить по концентрации одного из нескольких компонентов котловой воды, например, диоксида кремния, обычно с установленной периодичностью определяют предельно допустимые концентрации всех компонентов котловой воды. Затем можно установить зависимость между концентрацией каждого из этих компонентов и общим количеством растворенных твердых веществ, которое определяют при помощи прибора для измерения удельной проводимости, а регулирование частичного сброса воды в целях упрощения практически можно осуществлять в зависимости от величины удельной проводимости. Для регулирования частичного сброса воды можно проводить и другой простой анализ - анализ на содержание хлоридов.

Трубопровод для непрерывного частичного сброса воды должен быть расположен в той части барабана котла, где находятся обратные трубы для выпуска пара после отражательных перегородок (см. Рис. 39.20). Монтаж этого трубопровода категорически запрещается в тех местах, где не исключен отвод питательной воды и свежих непрореагировавших химикатов. Отверстия канала коллектора должны быть направлены вверх, для того чтобы в трубопровод не мог попасть пар, ограничивающий объем отвода воды и затрудняющий проведение анализа.

Как правило, оператор имеет возможность настраивать работу арматуры, регулирующей частичный сброс котловой воды, в том случае, если анализы показывают, что необходимо изменить объем частичного сброса воды. Так как котел работает при постоянном давлении, и сброс воды осуществляется в систему с постоянным давлением, этот способ регулирования является очень надежным и воспроизводимым. Регулирующая арматура может автоматически приводиться в действие устройством, регистрирующим удельную проводимость.

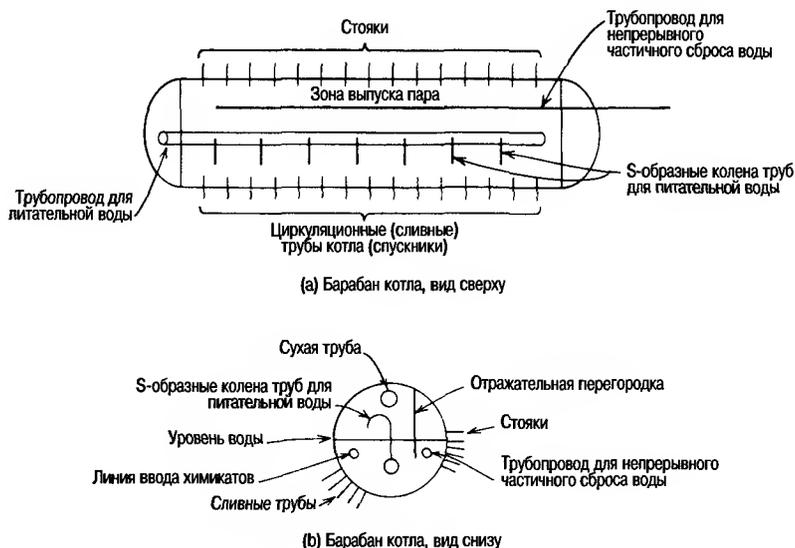


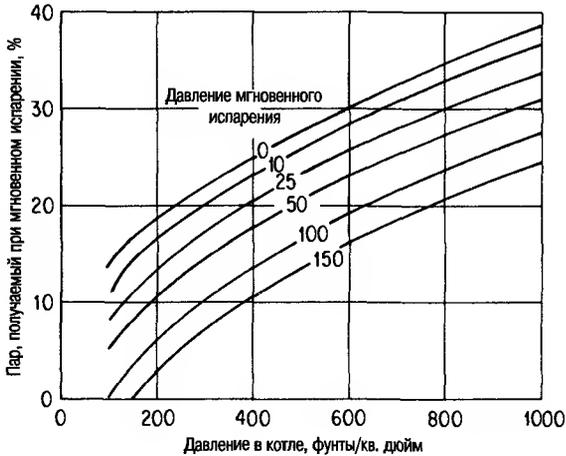
Рис. 39.20 Обычное место расположения трубопровода для непрерывного частичного сброса воды.

На большей части электростанций установлены системы утилизации тепла при частичном сбросе воды из барабана котла. На небольших электростанциях отводимую воду можно пропускать непосредственно через теплообменник, где она до деаэрирующего подогревателя отдает свое тепло подпиточной воде. На больших электростанциях отводимая вода направляется в резервуар для мгновенного испарения, усредненный по отношению к линии технологического пара, работающей, например, при избыточном давлении 15 фунтов/кв. дюйм (1 бар). В редких случаях частичный сброс воды из котла высокого давления может осуществляться в котел низкого давления для дополнительного выпаривания и получения пара или же в выпарной аппарат на электростанции общественного пользования. На некоторых электростанциях используются несколько резервуаров для мгновенного испарения, это зависит от теплового баланса электростанции и возможностей оптимальной утилизации тепла.

На многих промышленных предприятиях образуется избыток выпускного пара низкого давления, так как целый ряд разных процессов осуществляется при температурах ниже 250 - 300°F (118 - 149°C) и их потребность в этом выпускном паре непостоянна (этот пар называют выпускным потому, что его выпускают в точке отбора пара из турбины или со станции, где снимают показания давления). В процессе работы избыток пара низкого давления может иметь место постоянно или время от времени. Поскольку пар из резервуара для мгновенного испарения отводимой воды обычно подают в паропровод для пара низкого давления, который, в свою очередь, направляет его в деаэратор, то при использовании системы частичного сброса воды такого типа на предприятиях, имеющих избыток пара низкого давления, не происходит утилизация тепловой энергии; регенерация тепла в теплообменнике означает лишь уменьшение количества пара, конденсируемого в деаэраторе, и увеличение количества отработавшего пара, выпускаемого в атмосферу. Однако, может появиться необходимость в такой системе частичного сброса воды, которая могла бы обеспечить охлаждение воды, сбрасываемой в канализационный коллектор, или конденсацию отработавшего пара для получения подпиточной воды высокой степени чистоты.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Количество пара, получаемого путем частичного сброса воды в резервуар для мгновенного испарения, можно рассчитать при помощи графика, представленного на Рис. 39.21. Некоторые типичные системы частичного сброса воды показаны на Рис. 39.22 и 39.23. При регенерации тепла в теплообменнике обычно проектируют теплообменник с таким расчетом, чтобы обеспечить снижение температуры сбрасываемой воды до температуры охлаждающей воды - 10-20°F (6-11°C), которая обычно используется в качестве подпиточной воды.



Формула для точных расчетов:

$$\% \text{ пара, получаемого при мгновенном испарении} = \frac{(h_{f(1)} - h_{f(2)})}{h_{fg(2)}}$$

где:

$h_{f(1)}$  = энтальпия котловой воды при давлении котла 1

$h_{f(2)}$  = энтальпия отводимой воды при давлении мгновенного испарения 2

$h_{fg(2)}$  = дополнительная энтальпия парообразования при превращении воды в пар при давлении мгновенного испарения

Рис. 39.21 Получение пара путем мгновенного испарения воды системы частичного сброса из котла.

## ТИПЫ КОТЛОВ

Котел - это сосуд, в котором вода при нагревании непрерывно превращается в пар. При проектировании котла основная задача состоит в том, чтобы обеспечить максимально возможную степень теплопоглощения. Другие задачи - производство чистого пара и обеспечение безопасной и надежной эксплуатации.

Возможности изменения конструкции парогенератора почти безграничны. Это частично можно объяснить тем, что любая новая разработка, способствующая повышению качества подпиточной воды котла, является для проектировщика стимулом к тому, чтобы сделать парогенератор более компактным и производительным.

Наличие разных типов конструкций объясняется многими факторами, которые следует учитывать при выборе и эксплуатации парогенератора: к ним от-



## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Каждый из этих факторов влияет на способ образования пузырьков пара и механизм выпаривания котловой воды на поверхности металла. На Рис. 39.24 показано, как на стадии формирования пузырьков начинается образование отложений накипи, имеющих форму колец, и как протекает процесс полного заполнения этих колец накипью, если не осуществляется надлежащий контроль состава химической среды.

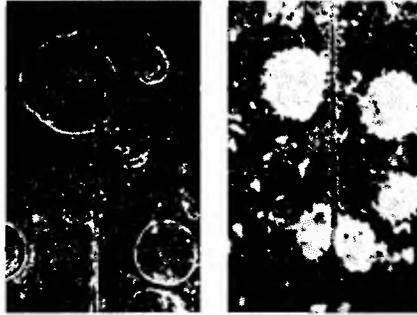


Рис. 39.24 Процесс образования накипи в начальной стадии.

Различают две основные конструкции котлов: жаротрубные и водотрубные. В жаротрубных котлах пламя и горячие газы находятся в трубах, смонтированных в виде пучка в нижнем барабане котла. Вода циркулирует с наружной стороны этих труб (Рис. 39.25). В процессе превращения воды в пар, он поднимается в верхнюю часть барабана котла и выходит через паровой коллектор. Жаротрубные котлы являются эффективными парогенераторами, если потреб-

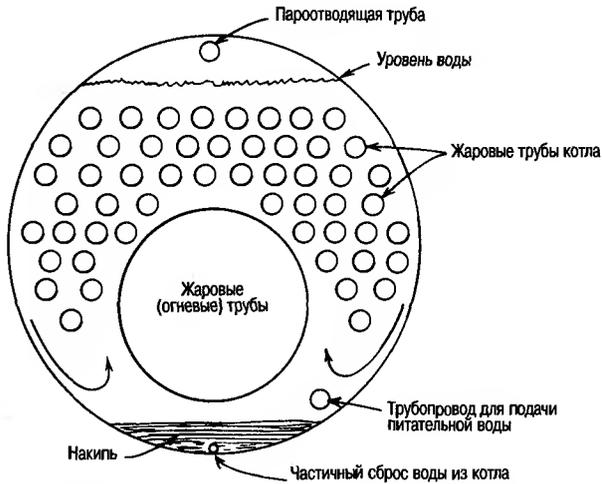


Рис. 39.25 Циркуляция воды в жаротрубном котле. Для котлов низкого давления такой конструкции часто проводилась обработка методом коагуляции (карбонатами) и фактически они представляли собой установки для высокотемпературного умягчения. Такой котел аналогичен котлу паровоза.

ность в паре не превышает 150 000 фунтов/час (68 000 кг/час), а давление - 150 фунтов/кв. дюйм (10 бар). Для работы при более высоком давлении и с более высокой паропроизводительностью в этой конструкции необходимо увеличить толщину стенок котла и стенок труб, следовательно, при превышении вышеуказанных пределов более рентабельными являются водотрубные котлы.

Водотрубный котел отличается от жаротрубного тем, что пламя и имеющие высокую температуру газообразные продукты сгорания проходят с наружной стороны труб, а вода циркулирует в трубах. Сжигание топлива происходит в топке котла; часть водяных труб образует стены топки.

В контуре циркуляции простого водотрубного котла (Рис. 39.26) пузырьки пара формируются на нагретой стороне труб. Плотность образующейся пароводяной смеси ниже плотности более холодной воды на не нагретой стороне труб, поэтому эта смесь поднимается вверх и циркулирует в системе. Пузырьки пара поднимаются вверх, пока не достигнут верхнего разделительного барабана котла, где пар выделяется из воды в паровое пространство.

Котлы с естественной циркуляцией, в которых циркуляция обеспечивается за счет разности плотностей, обычно, имеют много параллельных контуров. Те участки труб, по которым нагретая вода поднимается к верхнему разделительному барабану котла, называют стояками, а те, по которым охлажденная вода поступает вниз - спускниками. Обычно циркуляция осуществляется между несколькими барабанами. В верхнем разделительном барабане котла происходит разделение пара и воды; в нижнем барабане разделяют воду и взвешенные твердые вещества и накипь. На Рис. 39.27 представлена схема котла такой конструкции, на которой показаны стояки, спускники и местонахождение пара, а также нижний барабан котла. Эти основные узлы имеются во всех котлах с естественной циркуляцией, независимо от особенностей конструкции котла.

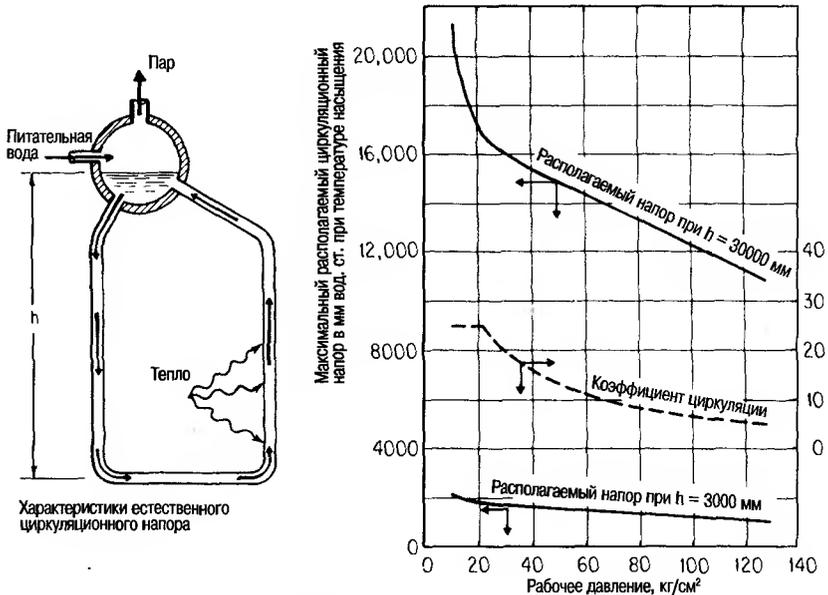
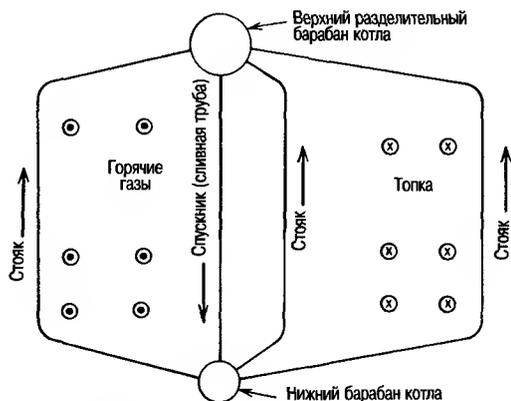


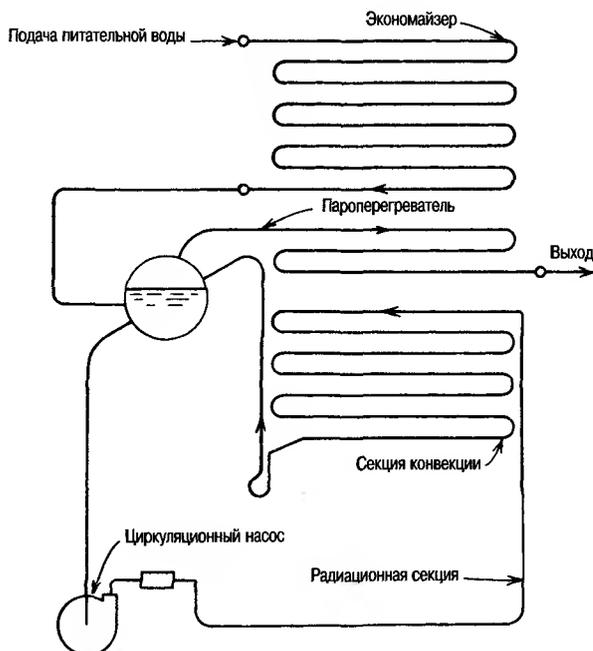
Рис. 39.26 Циркуляция воды в водотрубном котле. На графике показано, как уменьшается коэффициент циркуляции при повышении давления в котле. Обратите также внимание на уменьшение располагаемого напора для небольшого транспортабельного котла (высотой 3000 мм, т.е. 10 футов) по сравнению с котлом высотой 100 футов, собранным на месте монтажа. (Публикация с разрешения *Combustion Engineering*.)

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ



**Рис. 39.27** Циркуляция в двухбарабанном котле.

В котлах с принудительной циркуляцией циркуляция воды обеспечивается при помощи насоса (Рис. 39.28). Этот способ является более эффективным для установления требуемого режима циркуляции, чем просто за счет разности плотностей. Это очень важно в тех случаях, когда имеется возможность изме-



**Рис. 39.28** В тех случаях, когда естественная циркуляция невозможна из-за давления или определенной высотной отметки, циркуляция воды в котле обеспечивается при помощи насосов.

нять паропроизводительность котла в широких пределах. Если высота котельной установки ограничена имеющейся площадью, то разность плотностей будет слишком мала, чтобы обеспечить естественную циркуляцию и, следовательно, более целесообразной становится принудительная циркуляция. Этот тип циркуляции является выгодным также при высоких давлениях, когда разность плотностей пара и воды уменьшается. Для электростанций общего пользования разработана специальная конструкция котлов - прямоточные котлы.

Обеспечив тесный контакт воды с источником теплоты, можно повысить кпд котлоагрегата. Трубы встроены в топку котла в целях поглощения максимально возможного количества теплоты. Как правило, вся топка, так называемая радиационная секция, окружена экранными трубами, по которым циркулирует вода (Рис. 39.29). Различные секции труб котла соединены коллекторами, названия которых определяются их местоположением, например, коллекторы топочного экрана или коллектор барабана.

Для обеспечения высокого кпд турбины и длительного срока службы оборудования почти при любом режиме работы первостепенное значение имеет качество пара. Разделение котловой воды и пара осуществляется при помощи циклонных сепараторов и парочистных скрубберов, расположенных в верхнем разделительном барабане котла (Рис. 39.30). Пар, поступающий в разделительный барабан котла, посредством направляющих перегородок сначала направ-

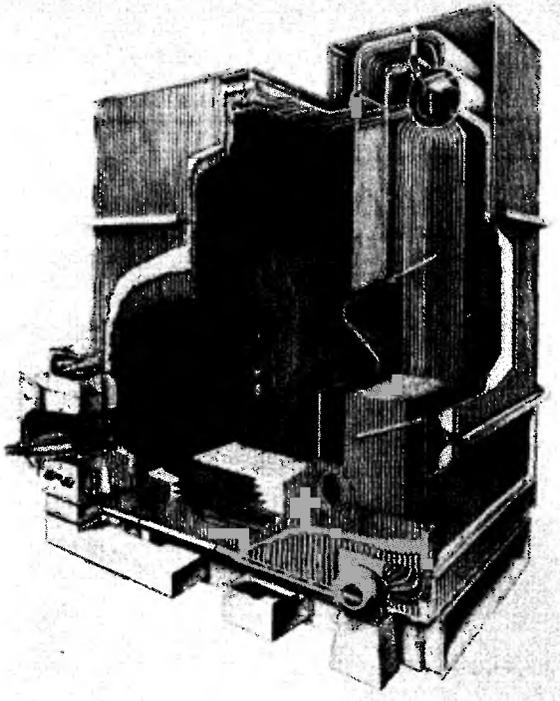


Рис. 39.29 В этом котле радиационная секция топки охлаждается боковыми экранными трубами, в которых образуется пар. При такой конструкции благодаря тангенциальному расположению горелок обеспечивается турбулентность, способствующая полному сгоранию. (Публикация с разрешения *Combustion Engineering*.)

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

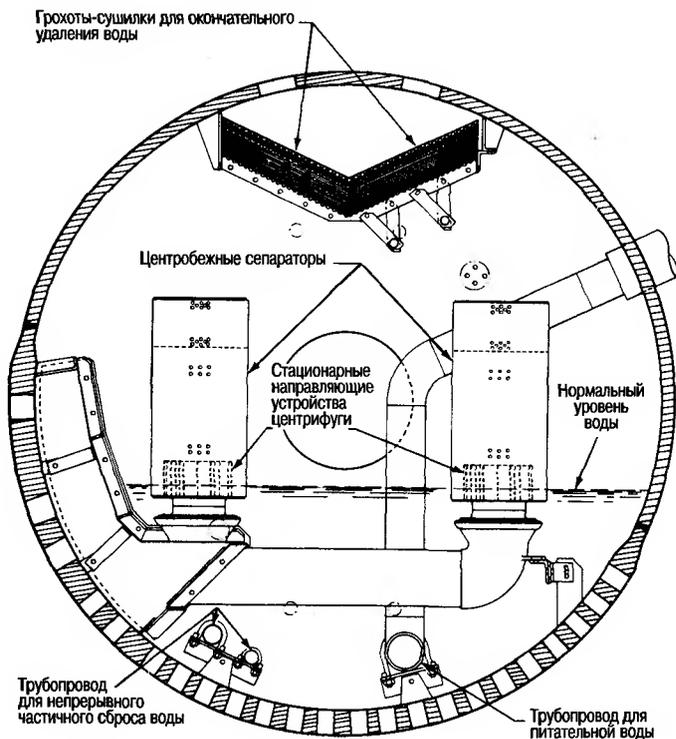


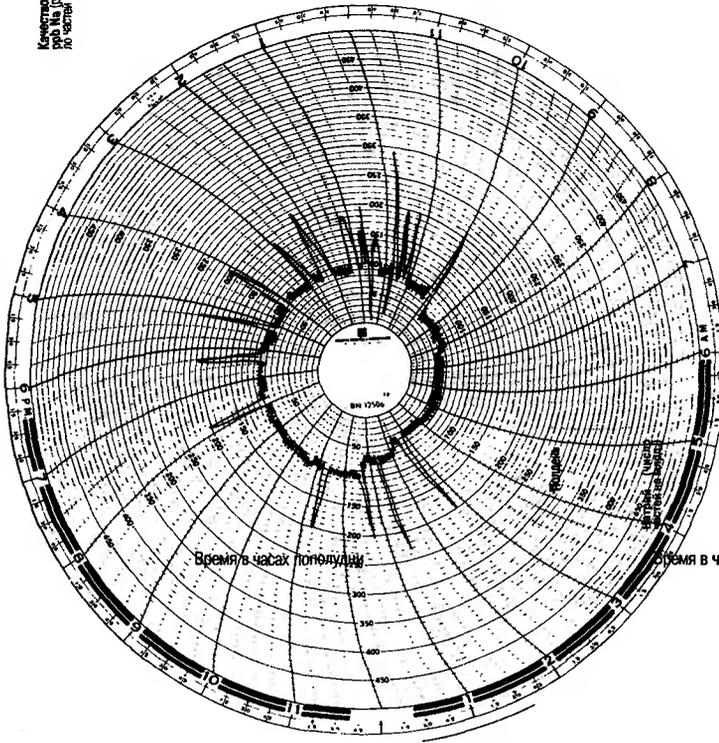
Рис. 39.30 В верхнем разделительном барабане котла вода удаляется при помощи циклонных сепараторов, а затем - при помощи грохотов-сушилок. (Публикация с разрешения *Combustion Engineering*.)

ляется в циклонный сепаратор. В циклонах пар на своем пути к выходу в верхней части сепаратора движется по спирали, и под действием центробежной силы происходит разделение воды и пара. Очищенный пар выходит в верхней части сепаратора, а более тяжелая вода сливается в нижней части и снова поступает в барабан котла.

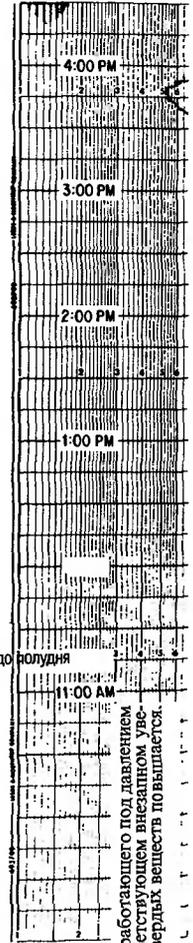
После пропускa через циклонные сепараторы окончательное удаление увлекаемой паром воды осуществляется во вторичных пароочистителях. В них имеются направляющие перегородки, которые изменяют направление пара таким образом, чтобы отражающаяся от них вода стекала обратно в разделительный барабан. В зависимости от конструкции и КПД сепараторов содержание увлекаемой паром воды на выходе не должно превышать 0,1 - 0,5%. В котлах высокого давления эти показатели намного лучше, что объясняется их более сложной конструкцией, обусловленной техническими условиями очистки пара низкого давления натрием.

Качество пара определяется содержанием в нем унесенной влаги. Если качество пара составляет 95%, то это означает, что содержание в нем влаги равно 5%. Влагосодержание можно измерить термодинамическим способом при помощи так называемого калориметра с дросселированием, но можно определить и с большей степенью точности путем измерения содержания твердых веществ в унесенной влаге. Так как присутствующие в котле твердые вещества, в основ-

Качество пара  
по шкале качества  
по часам (по мПа).



Полдень



Полночь

Рис. 39.31 Анализ пара, выпускаемого из котла, работающего под давлением 2,30 фунтов/кв. дюйм, показывает, что при соответствующем внезапном увеличении потребности в паре содержание в нем твердых веществ повысится.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

ном, представлены солями натрия, то используют специальный ионоселективный электрод для измерения содержания натрия. При помощи такого электрода определяют содержание натрия в пробе конденсированного пара.

На Рис. 39.31 представлена кривая, показывающая содержание натрия в паре, выходящем из котла, работающего под давлением 250 фунт/кв. дюйм (17 бар), и показано влияние эксплуатационного режима котла на содержание натрия, которое характеризует количество увлекаемой паром котловой воды. На графике расхода пара видны внезапные выбросы, ставшие причиной большого уноса натрия. Если предположить, что содержание натрия в котловой воде составляет 500 мг/л, то при содержании натрия в паре, равном 50 мкг/л, влажность пара можно рассчитать по приведенной ниже формуле:

$$\begin{aligned}\text{Влажность, \%} &= \frac{\text{мкг Na/л в паре}}{\text{мкг Na/л в котловой воде}} \times 0,1 = \\ &= \frac{50 \times 0,1}{500} = 0,01\%\end{aligned}$$

Средний коэффициент полезного действия водотрубного котла, производящего насыщенный пар, равен приблизительно 85%. Наибольшее количество тепла теряется с горячими топочными газами и в результате теплового излучения. При помощи дополнительных устройств для утилизации тепла можно повысить кпд котла.

В Таблице 39.11 приведены результаты исследования обычных потерь энергии в простой промышленной котельной установке. Речь идет о мазутном котле, работающем под давлением 250 фунтов/кв. дюйм и производящем насыщенный пар для процесса, в котором не предусмотрены устройства для утилизации тепла. В этом примере на установке обеспечен оптимальный водный режим, при котором объем частичного сброса воды составляет всего лишь 3,5%, и повышение кпд для такой конструкции возможно лишь путем изменения условий сжигания топлива. Однако, потери энергии можно было бы существенно уменьшить, если при модернизации установки предусмотреть вспомогательное оборудование для утилизации тепла.

**Таблица 39.11** Распределение потерь энергии при эксплуатации котла

*(Все данные в миллионах британских тепловых единиц/день)*

	Фактические потери	Потенциал	Уменьшение потерь энергии
Частичный сброс воды	170,0	170,0	0
Тепло топочных газов	287,0	275,5	11,5
Избыток воздуха	96,9	49,8	47,1
Итого	401,0	342,4	58,6

## ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛИ И ДРУГОЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Термодинамический кпд можно увеличить путем повышения температуры пара выше точки насыщения. Для этого пар пропускают через ряд труб, так называемый пароперегреватель, находящийся в радиационной секции котла (Рис. 39.32). Точно так же пар после отдачи только части своего теплосодержания и снижения давления может быть подогрет почти до начальной температуры и использован

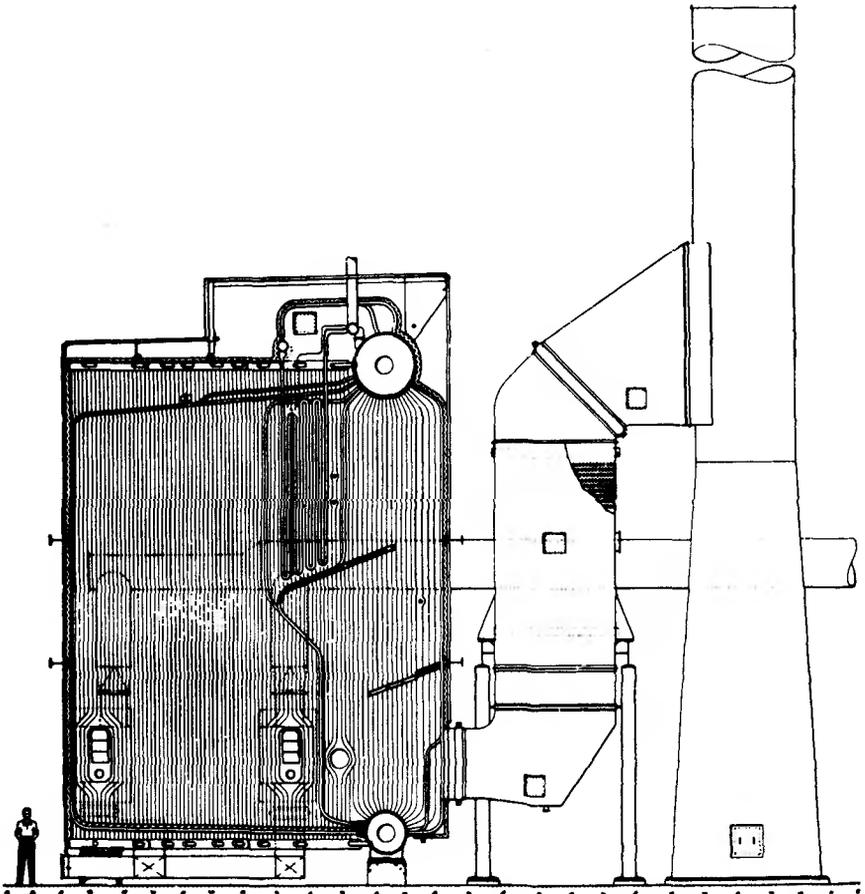


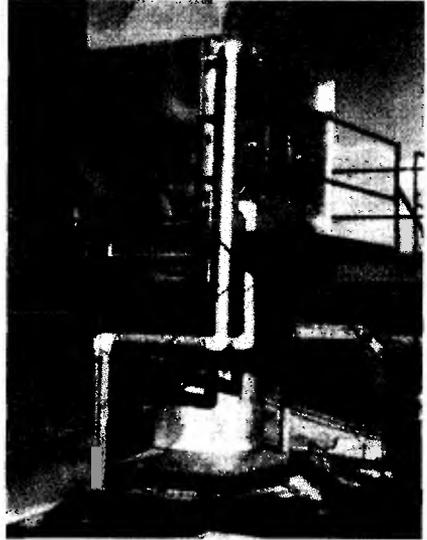
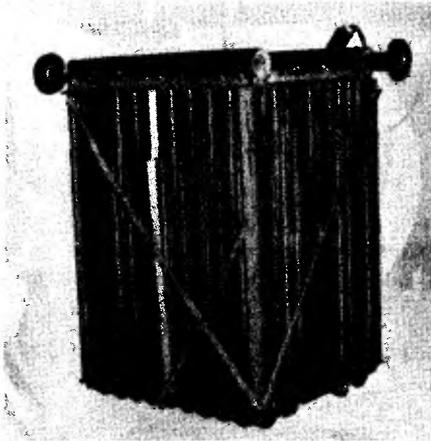
Рис. 39.32 После выхода насыщенного пара из барабана котла можно повысить его теплосодержание в теплообменнике, так называемом пароперегревателе; здесь показан пароперегреватель, установленный в топке, предназначенной для сжигания  $\text{CO}$ , получаемого на нефтеперерабатывающих заводах в виде побочного продукта каталитического крекинга. (Публикация с разрешения *Combustion Engineering*.)

повторно. Эта операция осуществляется в пучке труб, так называемом промежуточном пароперегревателе, также находящимся в радиационной секции.

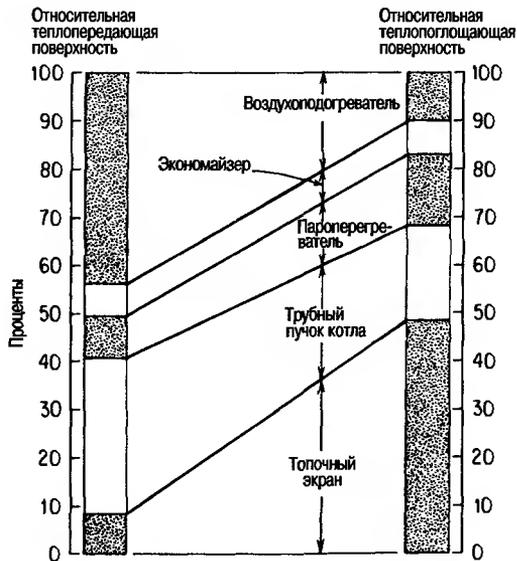
Существенного увеличения кпд можно достичь путем повышения температуры поступающей в котел питательной воды почти до температуры котловой воды за счет рекуперации тепла горячих топочных газов перед отводом их через дымовую трубу в атмосферу. Такой подогрев питательной воды осуществляется в экономайзере, см. Рис. 39.33.

Аналогичным образом, необходимый для сжигания в топке воздух, может утилизировать дополнительную теплоту топочных газов при прохождении через ряд труб, так называемые воздухоподогреватели. Они обычно расположены непосредственно после экономайзера. На Рис. 39.4 показано относительное увеличение поглощения теплоты за счет установки такого дополнительного оборудования для рекуперации теплоты.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ



**Рис. 39.33** Теплота топочных газов передается питательной воде в экономайзере и, кроме того, возможна рекуперация теплоты путем подогрева воздуха для горения. Пучок труб теплообменника (слева) установлен в дымовой трубе (справа). (публикация с разрешения General Resource Corporation.)

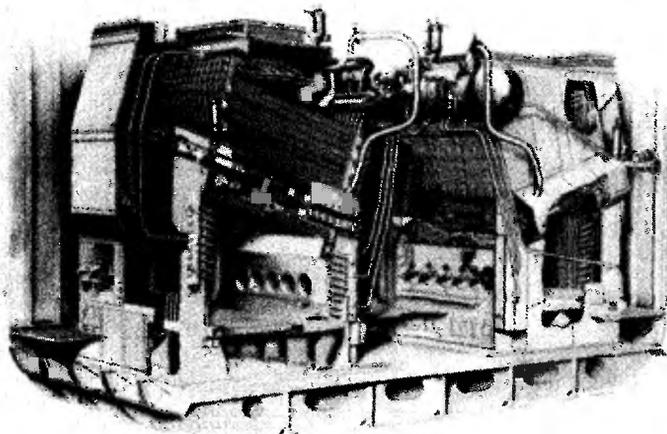


**Рис. 39.34** На этой схеме показаны относительные режимы теплопередачи для разных секций парогенератора. (Перепечатка с разрешения из отчета Power Special Report, "Steam Generation", июнь 1964.)

Водотрубные котлы могут быть выполнены в виде горизонтально-водотрубных котлов или в виде барабанных котлов. Горизонтально- водотрубный котел смонтирован из трубных пучков, обычно расположенных в шахматном порядке, как показано на Рис. 39.35, с углом наклона приблизительно  $15^\circ$  для улучшения циркуляции. Концы труб расширяются в коллекторы, за счет чего обеспечивается циркуляция между трубами и верхним разделительным барабаном котла. По отношению к оси трубного пучка барабан может быть или продольным или поперечным. Горизонтально-водотрубные котлы имеют следующие преимущества: хорошая видимость через трубы при осмотре, удобство при замене труб, небольшая высота конструкции и доступность всех узлов для осмотра и очистки на стороне газа вручную, если это потребуется во время эксплуатации. Котлы такой конструкции имеют некоторые недостатки: затрудненный доступ из-за наличия большого числа крышек отверстий и уплотнений, которые следует вручную снимать, заменять и уплотнять; ограниченные поверхности для отделения пара, не обеспечивающие хорошего разделения пара и воды при высокой паропроизводительности, и ограниченная паропроизводительность вследствие относительно малой кратности циркуляции и плохого распределения.

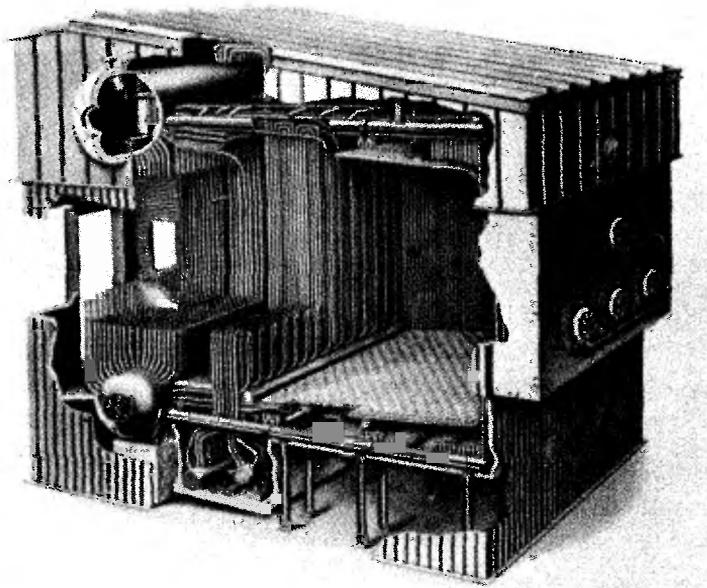
Паропроизводительность горизонтально-водотрубного котла составляет приблизительно 10 000 фунтов/час на фут ширины котла.

Барабанный котел представляет собой котел, имеющий несколько барабанов; в нижней части расположен барабан для сбора шлама, другие барабаны, так называемые разделительные барабаны, находятся в верхней части котла. На Рис. 39.36 и 39.37 показаны двух- и трехбарабанные водотрубные котлы. В барабанном котле трубы или установлены с наклоном, или смонтированы в виде вертикальных трубных пучков в пределах топочного пространства, или же смонтированы в виде топочного экрана с опорой из огнеупорного материала. Барабанный котел является высокопроизводительным парогенератором, быстро реагирующим на колебания нагрузки, что объясняется относительно малым объемом воды для его установочной генерирующей мощности. Преимущества барабанного котла: большая экономия издержек производства и эксплуатации



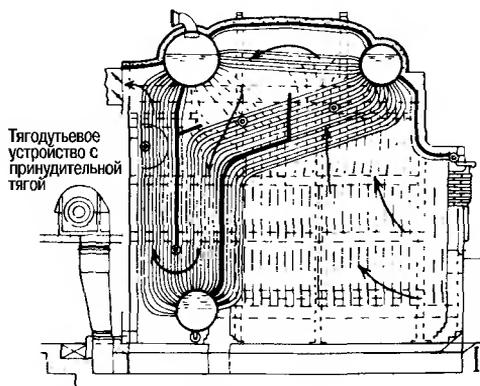
**Рис. 39.35** В этой конструкции котла для производства пара используются наклонные горизонтальные трубы, на концах которых имеются коллекторы, соединенные с барабаном котла. Этот котлоагрегат предназначен для эксплуатации на морских судах. (Публикация с разрешения Babcock & Wilcox Company.)

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ



**Рис. 39.36** Двухбарабанный котел с трубами, смонтированными в виде топочного экрана и поглощающими тепло в радиационной секции топки котла. (Публикация с разрешения *Babcock & Wilcox Company.*)

онных издержек, достигаемость для осмотра, чистки и техобслуживания, а также способность работать с высокой паропроизводительностью и поставлять сухой пар.



**Рис. 39.37** Трехбарабанный котел, который часто встречается на старых электростанциях и широко использовался до разработки конструкции котла с трубами в виде топочного экрана

Барабанные котлы обычно классифицируют по числу барабанов и способу монтажа труб в котле (Рис. 39.38). Различают три основных типа:

**Тип А:** Котел типа А состоит из одного разделительного барабана и двух барабанов для сбора шлама или коллекторов, расположенных в виде буквы А; разделительный барабан расположен в верхней части, а коллекторы - в нижней части. Частичный сброс воды в нижней части необходимо проводить из обоих коллекторов.

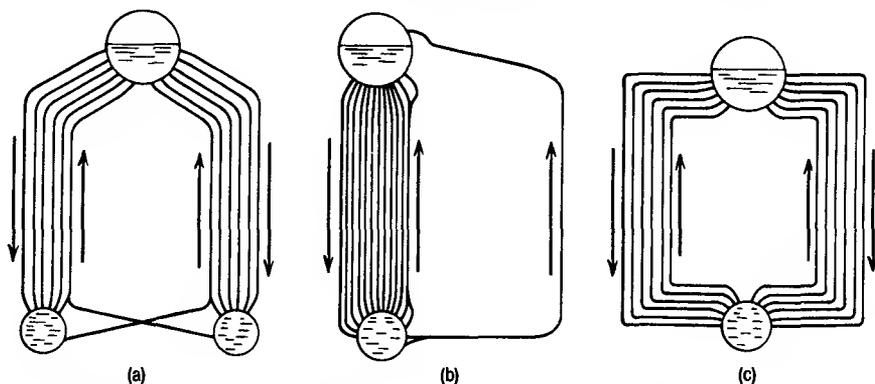
**Тип D:** В котлах типа D разделительный барабан и коллектор расположены непосредственно один над другим с одной стороны топки в виде буквы D. Ряд труб проходит вертикально между нижним барабаном и верхним разделительным барабаном. Остальные трубы смонтированы горизонтально и идут от разделительного и нижнего барабанов к стенке топки, где они образуют топочный экран.

**Тип O:** В этой конструкции разделительный барабан также установлен непосредственно над коллектором, однако оба барабана расположены в центре котла, а соединительные трубы смонтированы в виде буквы O.

В зависимости от размеров и сложности конструкции котла он может быть смонтирован на месте или предварительно собран на заводе-изготовителе. Так как размеры транспортабельных котлов обычно меньше, то для получения требуемой паропроизводительности они должны работать с высокими коэффициентами теплопередачи. По этой причине, для них может потребоваться более тщательный контроль при обработке котловой воды и эксплуатации, чем для котлов, смонтированных на площадке.

Разумеется, что в будущем проектирование котлов будет осуществляться с учетом экологических факторов и возможностей использования топлива. Например, одной из возможностей решения проблем охраны окружающей среды при сжигании угля является сжигание в псевдоожиженном слое. При этом могут появиться новые проблемы в секции производства пара, но даже в этом случае по-прежнему будут применяться основные принципы водно-химического режима котловой воды.

Котел с псевдоожиженным слоем - новейшая из конструкций котлов, используемых на промышленных предприятиях и на электростанциях общего



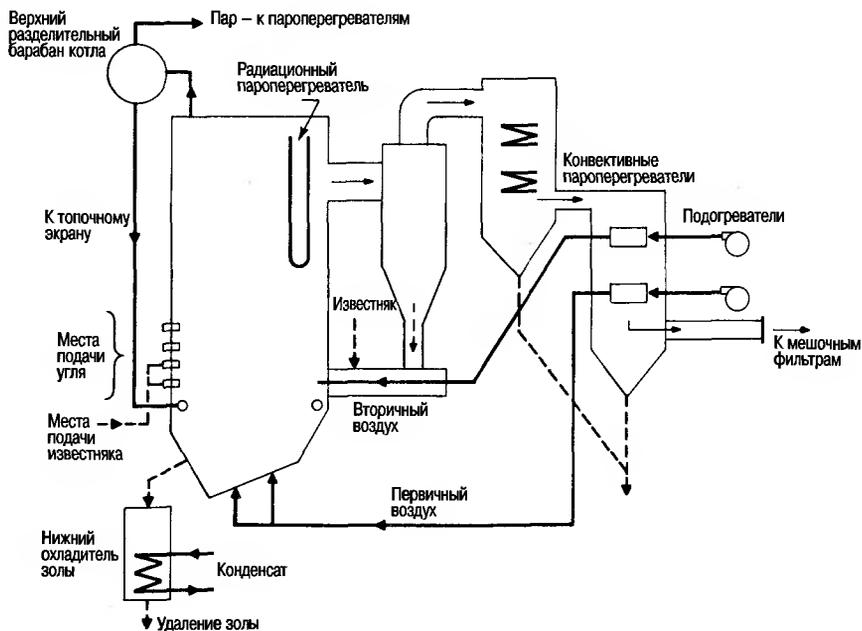
**Рис. 39.38** Схемы расположения барабанов и труб в котлах, имеющих конструкцию типа А, D и O. (a) тип А, с большим верхним барабаном для эффективного разделения пара и воды и нижними барабанами (коллекторами) для циркуляции. (b) тип D, с паровыми трубами, выпускающими пар вблизи труб для воды; расположение труб для питательной воды и частичного сброса воды в этой конструкции обеспечивает больший эффект. (c) тип O имеет схему циркуляции, аналогичную типу А; стойки входят в центральную часть разделительного барабана.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

пользования. Основная концепция может иметь модификации, но фундаментальные принципы остаются одинаковыми: сжигание топлива в присутствии слоя известняка, для того чтобы щелочной слой связывал окислы серы и азота, во избежание превышения допустимых пределов выбросов. На Рис. 39.39 показаны основные элементы конструкции котла с циркулирующим псевдоожиженным слоем (CFB). Путем изменения соотношения объемов первичного и вторичного воздуха можно точно отрегулировать условия сжигания, при которых образование  $\text{NO}_x$  будет минимальным. Большинство таких котлов рассчитаны на сжигание угля с высоким содержанием серы, но могут быть модифицированы с целью применения других широко используемых видов топлива или отходов производства, в том числе, осадков сточных вод со станций очистки.

При обычном ограничении на выброс газообразных загрязнений, составляющем 1,2 фунта  $\text{SO}_2$  на миллион британских тепловых единиц, для удерживания примерно 80% серы требуется приблизительно 6 фунтов известняка на фунт серы в угле. Для обеспечения приемлемого теплового КПД при смешивании твердых частиц угольной золы и известняка обычно требуется рекуперация теплоты отработавших твердых веществ.

Некоторые технологии сжигания в псевдоожиженном слое обеспечивают возможность переоборудования имеющихся котлов с механической загрузкой топлива в котлы с псевдоожиженным слоем известняка. Такая новая конструкция, по-видимому, будет идеальной в условиях современной тенденции к комбинированному производству тепловой и электрической энергии промышленными тепловыми электростанциями.



**Рис. 39.39** В топке с псевдоожиженным слоем известняк с углем или другим топливом подают в нижнюю секцию топочной камеры для удерживания кислых газов,  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$ . Известняковую мелочь удаляют из топочного газа при помощи циклонов и возвращают для повторного использования, чтобы улучшить улавливание кислых газов. Здесь представлена схема котла с псевдоожиженным слоем, это — одна из нескольких имеющихся конструкций.

При проектировании котлов имеется целый ряд аспектов, от которых зависит выбор и контроль программы внутренней обработки. Прежде всего, имеется ввиду смешивание и распределение химических веществ и питательной воды. Во многих котлах при определении местоположения трубопроводов питательной воды, системы распределения химических веществ и линий частичного сброса воды скорее исходили из соображений удобства проектирования и изготовления, а не из целесообразности. Очень важно обеспечить смешивание котловой воды, питательной воды и химикатов, используемых для обработки до того, как более холодная вода поступает в спускные трубы и затем нагревается в радиационной секции. Неправильное смешивание может стать причиной образования накипи в спускных трубах и возникновения проблем при обработке активного ила.

### **ЗАГРЯЗНЯЮЩИЕ ПРИМЕСИ В ВОЗВРАТНОМ КОНДЕНСАТЕ**

Поскольку даже для котлов среднего давления (600-900 фунтов/кв. дюйм) теперь все чаще используют деминерализованную воду, основным источником загрязняющих примесей в питательной воде является уже не подпиточная вода, а скорее возвратный конденсат, содержащий в виде примесей, в первую очередь, продукты коррозии.

Эти продукты коррозии не растворяются при образовании хелатов и плохо диспергируются. Если они осаждаются, то под ними могут концентрироваться соли, содержащиеся в котловой воде, так как эти отложения относительно пористые, и через них может проникать котловая вода, из которой выделяется только пар. Это может вызвать щелочную коррозию. Чтобы этого не произошло, следует с установленной периодичностью проводить чистку котлов.

Вероятность возникновения щелочной коррозии возрастает при изменении нагрузок и режима сжигания, что приводит к изгибу и растрескиванию магнетитового слоя обычной плотности на металле котла, что может привести к коррозии металла.

В котлах с принудительной циркуляцией наблюдается тенденция к образованию отложений на участках после диафрагмовых расходомеров. Во избежание этого питательная вода не должна содержать веществ, образующих отложения, в первую очередь, продуктов коррозии, поэтому можно успешно осуществлять программу обработки химическими веществами. Поскольку конденсат является источником продуктов коррозии, может потребоваться конденсатоочистка. Сепараторы пара играют важную роль в производстве пара приемлемого качества, и их износ приведет к ухудшению качества пара.

В период простоев в котлах нередко развивается коррозия. При контакте влажных поверхностей металла с воздухом находящиеся в нерабочем состоянии котлы становятся очень уязвимыми для коррозии. Во избежание такой коррозии требуется защита металла котла либо (1) путем поддержания поверхности металла в совершенно сухом состоянии, либо (2) путем полного удаления воздуха из котла посредством заполнения всего объема котла водой, прошедшей надлежащую обработку. Так как котлы могут иметь разные конструкции, то нет какой-либо единой детально проработанной процедуры, предписанной для всех этапов вывода котла из эксплуатации и учитывающей и химические, и механические аспекты. Основные принципы защиты котлов от коррозии просты.

Имеются два основных способа содержания котлов в нерабочем состоянии - содержание их в мокром и сухом состоянии. При содержании котла в сухом состоянии на лотках в барабане (или барабанах) котла распределяются лотки с химикатами, поглощающими влагу, например, с негашеной известью, после чего котел герметизируют. Альтернативный способ - содержание в мокром состоянии - заключается в удалении воздуха из котла путем заполнения всего объема котла, до перелива через край, водой, прошедшей специальную обработку. Для

вытеснения воздуха и создания газовой подушки для защиты поверхностей котла можно также использовать газообразный азот под небольшим давлением. Особое внимание во время простоя следует уделить защите пароперегревателей, в первую очередь, недренируемых.

Выбор мокрого или сухого способа содержания котла в нерабочем состоянии в значительной степени осуществляется в зависимости от продолжительности простоя. При длительных простоях предпочтительным является сухой способ; преимущество мокрого способа состоит в том, что повторный ввод котла в эксплуатацию может быть осуществлен в относительно короткий срок. Перед любым отключением котла рекомендуется слить воду, промыть котел струей жидкости и провести осмотр. При дефиците времени возможно содержание котла в мокром состоянии без предварительного слива воды. В этом случае в котел, непосредственно перед его отключением, следует ввести специальные химикаты для обработки, в том числе, катализированный сульфит, каустическую соду и органические диспергаторы.

### **ТИПЫ ОБОРУДОВАНИЯ, В КОТОРОМ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ПАР**

---

Получать энергию в виде пара выгодно, так как пар имеет высокое теплосодержание; кроме того, пар можно производить в одном месте и передавать многим различным энергопотребителям на территории завода. Пар можно использовать как источник тепла или как движущую силу.

При использовании пара в качестве источника тепла теплопередача может осуществляться путем прямого контакта пара с жидкой средой или с твердым предметом, как при очистке паром загрязненных маслом деталей. Наиболее простым примером использования пара для прямого нагрева может служить деаэрирующий подогреватель питательной воды в котельной установке. В этом случае пар служит не только для подогрева воды в системе питательной воды до наиболее эффективной температуры, но и выполняет функцию инертного газа, десорбируя кислород и углекислый газ из питательной воды и удаляя эти неконденсирующиеся газы из системы; деаэрирующий подогреватель представляет собой дегазатор более сложной конструкции. Еще более простой способ применения пара - это использование его для разбрызгивания и нагрева различных жидкостей, от пищевых продуктов - до сточных вод.

Другой пример прямого контакта пара с жидкостью - термокомпрессор, где пар высокого давления может быть использован для повышения давления пара, имеющего низкое давление, до такой величины, при которой его можно использовать. Например, для промышленной установки часто требуется избыток пара низкого давления 5-15 фунтов/кв. дюйм. Этой установке может потребоваться пар давлением 50-100 фунтов/кв. дюйм для сушилок, ребойлеров или для каких-либо других целей, где необходима более высокая температура. При помощи термокомпрессора можно повысить давление пара с 5 - 15 фунт/кв. дюйм до 50-100 фунтов/кв. дюйм, используя в паровом сопле термокомпрессора острый пар непосредственно из котла.

В большинстве случаев пар используется для косвенного нагрева через теплопередающую поверхность между паром и нагреваемой жидкой средой. Такие устройства называются поверхностными теплообменниками; к ним относятся самые различные устройства, например, конденсаторы, ступенчатые нагреватели, теплообменники для технологических жидкостей, ребойлеры, испарители и нагревательные приборы.

Самым обычным поверхностным теплообменником является кожухотрубный теплообменник, в котором теплопередача между паром или другой горячей жидкой средой и жидкой средой с более низкой температурой осуществляется главным образом благодаря теплопроводности разделяющей их стенки металлической трубы. Скорость теплопередачи зависит от разности температур

жидких сред, площади и толщины металлической поверхности и удельной проводимости самого металла. Кожухотрубные теплообменники могут иметь разные конструкции. Более сложные конструкции обычно имеют более высокую эффективность, но их стоимость выше и труднее проводить их очистку и техобслуживание.

Устройства для нагрева питательной воды глухим паром, известные также под названием ступенчатые нагреватели, представляют собой теплообменники, которые применяются на паросиловых установках для повышения теплового КПД путем повышения температуры питательной воды до значений, максимально приближающихся к значениям температуры котловой воды; причем для этой цели используется отработавший (выпускной) пар или пар из регулируемого отбора турбины. Система электростанции общего пользования может иметь до 12 нагревателей питательной воды, хотя обычно устанавливаются восемь; число нагревателей определяется наиболее целесообразным тепловым балансом. На Рис. 39.40 показан прямотрубный нагреватель воды для конденсатора; пар всегда находится в межтрубной зоне, а питательная вода проходит по трубам. В большинстве подогревателей питательной воды для изготовления кожуха, днища и трубных решеток используется углеродистая сталь. В подогревателях высокого давления трубы могут быть изготовлены из углеродистой стали, монель-металла или медно-никелевого сплава, легированного марганцем и железом; трубы подогревателей низкого давления обычно изготавливаются из углеродистой стали, нержавеющей стали, адмиралтейской латуни или медно-никелевого сплава 90-10, легированного марганцем и железом.

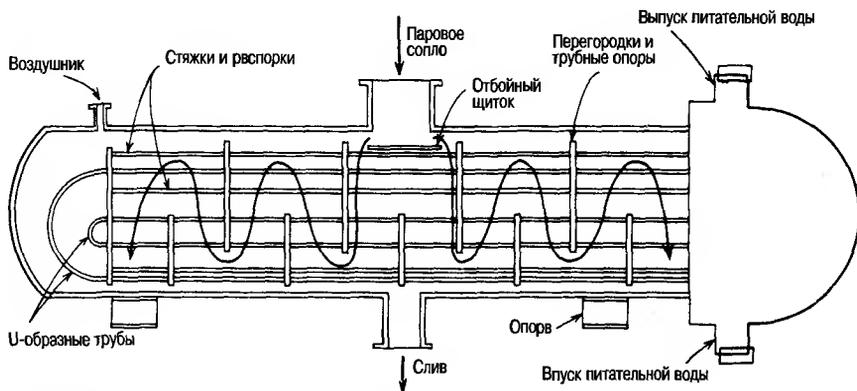
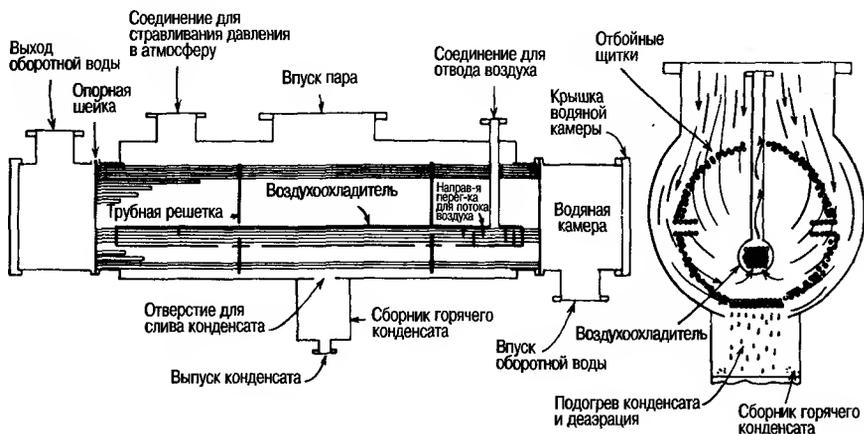


Рис. 39.40 Прямотрубный нагреватель питательной воды для конденсатора

Поверхностный конденсатор представляет собой специальную конструкцию кожухотрубного теплообменника, работающего под вакуумом, созданным конденсационным паром, выпускаемым из турбины или из технологического оборудования, например, многокорпусных испарителей, на заводах по переработке бокситов, фабриках по производству крафт-целлюлозы и сахарорафинных заводах. Неконденсирующиеся газы, такие как  $O_2$ ,  $CO_2$  и  $NH_3$ , удаляются парового пространства при помощи воздушных эжекторов и механических насосов. Конденсаторы электростанций общего пользования обычно имеют в сборнике горячего конденсата секцию дегазации или деаэрации, в которых также происходит удаление неконденсирующихся газов. На Рис. 39.41 показан типичный поверхностный конденсатор, какие применяются на электростанциях общего пользования.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ



**Рис. 39.41** Типичная конструкция поверхностного конденсатора. (Публикация с разрешения *Basco Division, American Precision Industries.*)

Охлаждающая вода, проходящая по трубам конденсатора, не обязательно является подпиточной или питательной водой. На электростанции общего пользования нет возможности утилизации этой теплоты, так как потребность в охлаждающей воде там намного выше потребности в подпиточной воде. Однако многие промышленные предприятия, такие как сталелитейные заводы, целлюлозно-бумажные фабрики, нуждаются в сравнительно больших объемах подпиточной воды, и, если использование регенерированной теплоты возможно, то для этой цели может использоваться охлаждающая вода конденсаторов; рекуперация теплоты возможна зимой, но невозможна летом; такая ситуация часто имеет место на целлюлозно-бумажных фабриках.

Ребойлеры представляют собой трубчатые теплообменники, часто применяемые на нефтеперерабатывающих заводах; обычно они монтируются в нижней части ректификационной колонны, где вокруг труб находятся перерабатываемые углеводороды, а пар подается в напорный ящик, из которого он распределяется по трубам. Это - один из нескольких способов технологического использования пара, когда пар проходит не с внешней стороны, а по трубам трубного пучка.

Для удобного обогрева офисов, складов и цехов широко используются нагревательные приборы. Если в распоряжении имеется пар, он часто используется в трубах нагревательных приборов.

На промышленных предприятиях имеется самое различное технологическое оборудование с паровой рубашкой, в том числе котлы, используемые на предприятиях пищевой промышленности, реакторы - в химической промышленности, барабанные сушилки и испарители. Последние обычно включают ряд аппаратов с элементами ребойлера, с конденсатором и теплообменником для получения оптимального теплового кпд. Многие из этих аппаратов являются аппаратами периодического действия, но некоторые аппараты более сложной конструкции, например, резервуар для растворения древесины, применяемый в целлюлозной промышленности, работают в непрерывном режиме. Ранее уже говорилось о технологии перегрева пара в целях повышения кпд цикла на установках, вырабатывающих электроэнергию при помощи турбин. Однако перегрев технологического пара нежелателен, в основном, из-за более низкого коэффициента теплопередачи, чем у насыщенного пара, и поэтому при использовании перегретого пара следует увеличивать габариты оборудования. (Опти-

мальный коэффициент теплопередачи получают при "капельной конденсации", когда капли конденсата неоднократно разрушают пленку, образующуюся на теплопередающей поверхности.)

Поэтому при использовании пара в технологических процессах часто возникает необходимость в охлаждении пара после перегрева. В пароохладителе нагнетают воду высшей степени очистки, и в процессе испарения этой воды из пара выделяется теплота; расход воды при нагнетании автоматически регулируется датчиками температуры, которые модулируют поток нагнетаемой воды. Регулятор температуры, имеющий некоторое отношение к пароохладителю, представляет собой устройство, применяемое для регулирования температуры перегрева в самом котле, особенно, когда нагрузка по пару не является постоянной и другие регуляторы температуры перегрева имеют тенденцию к заклиниванию или "бросанию".

В технологическом оборудовании, где используется пар, редко образуются какие-либо отложения, особенно, если это оборудование работает в непрерывном, устойчивом режиме; но иногда отложения все же появляются. Обычно они возникают из-за подсоса на сторону пара с технологической стороны аппарата из-за вакуума, который создается во время простоя, при этом происходит подсос загрязняющих примесей в негерметичную трубу. Грубые твердые примеси в котловой воде при периодическом смачивании и высыхании технологического оборудования также могут оседать в виде концентрата твердых веществ..

Намного более распространенной проблемой при эксплуатации технологического оборудования является коррозия, часто возникающая из-за подсоса кислорода в результате образования вакуума во время простоя оборудования или при регулировании расхода пара с помощью дросселя. В случае неисправности приборов для регулирования температуры и давления возможно повышение концентрации углекислого газа. Это можно быстро обнаружить по снижению величины рН конденсата на тех участках, где накапливается углекислый газ. Аммиак вызывает разрушение медных сплавов в местах подсоса  $O_2$ , особенно там, где концентрация  $NH_3$  превышает его начальную концентрацию в самом паре.

Как только в оборудовании, использующем пар, образуется конденсат, его необходимо слить, во избежание захлебывания вследствие уноса жидкости паровым потоком и уменьшения теплопередающей поверхности, контактирующей с паром. (Однако, в некоторых случаях предпочитают регулировать температуру процесса путем регулируемого захлебывания, а не путем дросселирования пара через паровой выпускной клапан.) Эту функцию выполняет конденсационный горшок и системы последующего сбора и передачи конденсата. Существует много различных конструкций конденсационных горшков; основные из них: (а) с управлением при помощи термостата (б) с поплавковым или ковшовым управлением и (в) с управлением при помощи диафрагмового расходомера. Считается, что все они могут эффективно использоваться при (а) удалении воздуха (или неконденсирующихся газов), что особенно важно в тех случаях, когда конденсат поступает в конденсационный горшок в циклическом режиме; примером может служить варочный котел на предприятии пищевой промышленности; (б) отводе конденсата с минимальными ограничениями и (в) для быстрого определения присутствия пара и уменьшения потерь пара из системы. Каждая из этих конструкций имеет свою нишу, но для того чтобы промышленные потребители пара осознали, что причиной больших потерь энергии в данном конкретном случае является неправильно выбранный тип конденсационного горшка (или дефектный или поврежденный конденсационный горшок), должен произойти энергетический кризис. В результате, на многих современных заводах, оператор, который представляет отчеты главному энергетик, проходит специальное обучение и является специалистом по конденсационным горшкам; он несет ответственность за выбор соответствующей конструкции для каждого конкретного случая и за проведение регулярного осмотра.

Конденсационный горшок, разумеется, не предназначен для передачи конденсата; это - дросселирующее устройство, а поток конденсата обусловлен перепадом давлений или градиентом уровня. Одной из проблем, возникающих при работе с конденсатом, является мгновенное парообразование, которое происходит при перепаде давления, что приводит к увеличению определенного объема перемещающегося потока. Еще одна часто возникающая проблема - подсос воздуха, который имеет место при дросселировании впускного парового клапана при низких нагрузках. Примером может служить распространенная проблема регулирования величины рН конденсата на заводах, где весной и осенью при изменении погодных условий используются паровые нагревательные приборы.

### **ПАР, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ДЛЯ ПРИВОДА В ДЕЙСТВИЕ**

В основном пар используется в качестве движущей силы, так как это - его единственное назначение в сфере коммунальных услуг, являющейся самым крупным потребителем энергии в наиболее развитых промышленных странах. Даже на средних промышленных предприятиях, где производство пара осуществляется, главным образом, для удовлетворения технологических потребностей, пар высокого давления может приводить в действие турбину, а отработавший пар затем может быть использован для технологических нужд. Турбины - главные первичные двигатели, потому что они компактны, эффективны и почти не требуют технического обслуживания; однако во всех странах мира на многих старых заводах пока еще применяются поршневые паровые двигатели. Эти первичные двигатели могут использоваться для прямого привода в действие насосов, компрессоров и других механических устройств или могут быть соединены с генератором, обеспечивающим электропитание устройств с приводом от электродвигателя и другого вспомогательного электрооборудования.

Проектирование современной паровой турбины явилось огромным техническим достижением - в первую очередь, для проектировщика, который сумел воплотить результаты сложных математических расчетов термодинамики на светокопиях чертежей, и, во-вторых, для изготовителя, который смог на основе сложного чертежа создать точные модели практически для массового производства. В простой одноступенчатой турбине пар направляют через ряд специальных профилированных сопел на лопатки или лопасти, закрепленные по периметру диска, присоединенного к валу турбины. Это - активная ступень турбины. После выхода пара с вращающихся лопаток для сбора пара и направления его на второй набор лопаток может быть использован второй ряд неподвижно закрепленных сопел; эту группу сопел и лопаток называют реакционной ступенью турбины. Большинство турбин являются многоступенчатыми, часть ступеней - активные, а часть - реакционные, что в полной мере зависит от требуемой производительности и соотношения затрат и эксплуатационных качеств. На Рис. 39.42 показана простая одноступенчатая турбина, а на Рис. 39.43 - многоступенчатая турбина, какие работают на электростанциях общего пользования.

В зависимости от режима работы различают два основных класса паровых турбин: конденсационная паровая турбина, в которой отработавший пар выпускается в конденсатор при давлении ниже атмосферного, и турбина с противодавлением, в которой пар под давлением выпускают в коллекторы технологического пара (на предприятиях бумажной промышленности, например, обычное давление - 100 фунтов/кв. дюйм). Далее, режимы работы и конструкции турбины классифицируют в зависимости от того, как поток пара проходит через турбину: режим лотка включает прямолинейный поток, промежуточный перегиб, автоматический отбор пара и неавтоматический отбор пара.

В прямоточных системах (Рис. 39.44) пар при полностью открытой дроссельной заслонке направляется соплами через весь блок ступеней турбины до

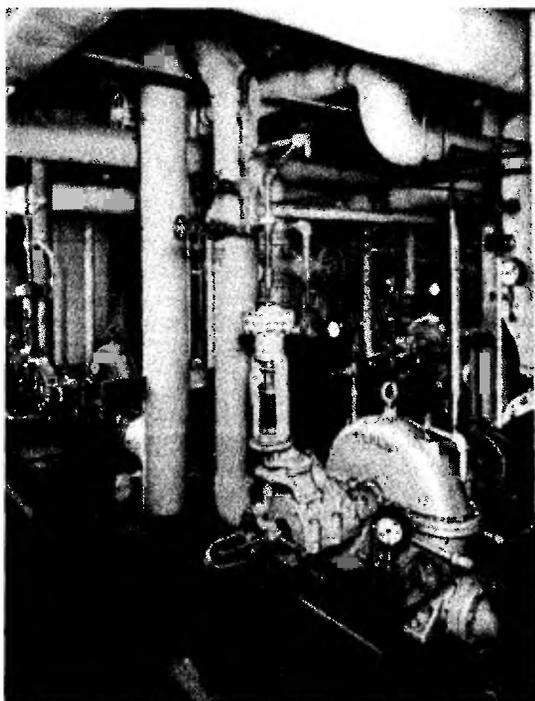
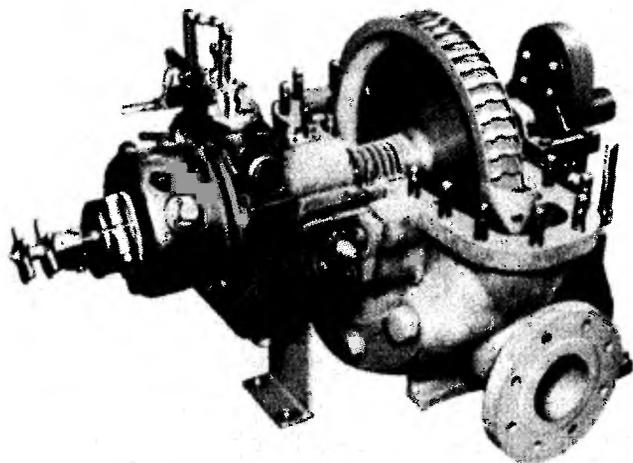


Рис. 39.42 Такая одноступенчатая турбина с цельнолитым рабочим колесом обычно используется для приведения в действие вспомогательного оборудования, например, насосов для питательной воды котла и ротационных компрессоров. Разрез турбины (вверху); заводская установка (внизу). (Из *Power Special Report, "Steam Turbines"*, июнь 1962. Публикация с разрешения Terry Corporation.)

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

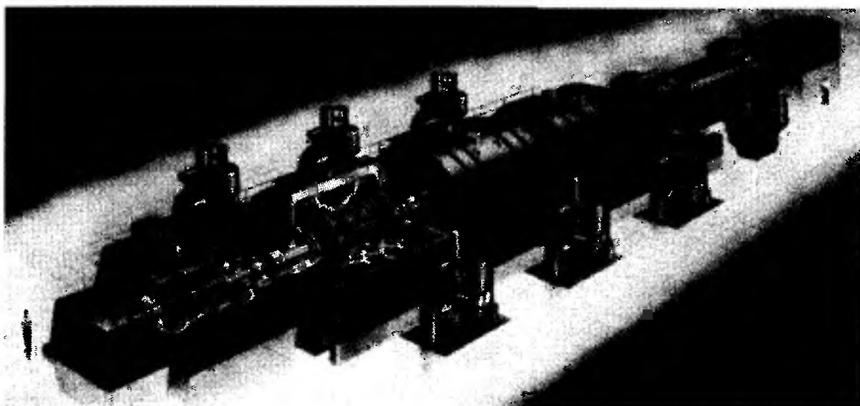


Рис. 39.43 Такие большие турбогенераторы обычно устанавливаются на энергоблоках АЭС. На разрезе показаны лопатки турбин высокого и низкого давления. (Из *Power Special Report, "Steam Turbines,"* июнь 1962. Публикация с разрешения *General Electric Company.*)

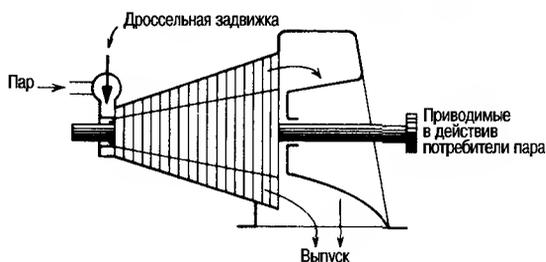


Рис. 39.44 Прямоточная гидротурбина. (Из *Power Special Report, "Steam Turbines,"* июнь 1962.)

выпуска. В турбинах с промежуточным перегревом пара (Рис. 39.45) увеличение кпд обеспечивается за счет выпуска пара на промежуточной ступени для перегрева в топке котла; пар с более высокой температурой возвращается на следующую ступень турбины для продолжения работы. При автоматическом отборе пар отбирается из главного потока в одной или нескольких точках для технологических нужд, а остаток направляется на выпуск (Рис. 39.46). При неавтоматическом отборе пара на одной или нескольких ступенях пар используется для подогрева питательной воды (Рис. 39.47).

Наиболее серьезная проблема при эксплуатации турбины, связанная с обработкой воды и эксплуатацией котла, - отложения на лопатках турбины. Это могут быть или отложения неорганических веществ, образующиеся наиболее часто, или отложения органических веществ. Некоторые летучие вещества, выделяющиеся из котла, могут конденсироваться при снижении давления и температуры по мере прохождения пара через турбину. Уже говорилось о том, что одним из летучих компонентов котловой воды является диоксид кремния, который в значительной степени способствует образованию отложений в турбинах; он имеет тенденцию оседать на ступенях низкого давления турбины, обычно при давлении до 50 фунтов/кв. дюйм. Предельно допустимые концентрации диоксида кремния в котловой воде рассчитаны с учетом того, что пар будет про-

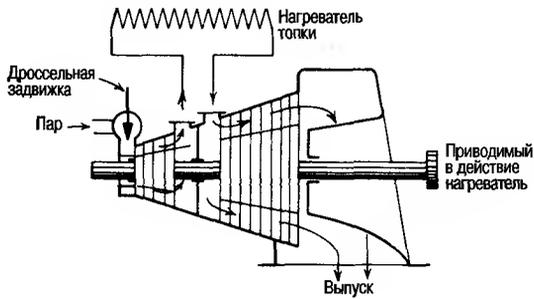


Рис. 39.45 Турбина с промежуточным перегревом. (Из Power Special Report. "Steam Turbines," июнь 1962.)

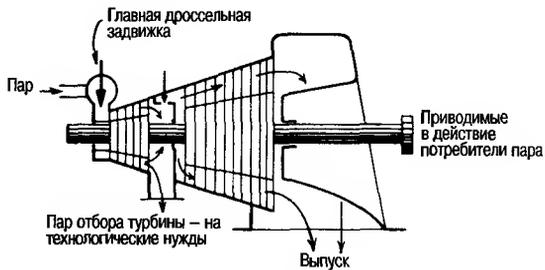


Рис. 39.46 Однократный автоматический отбор пара

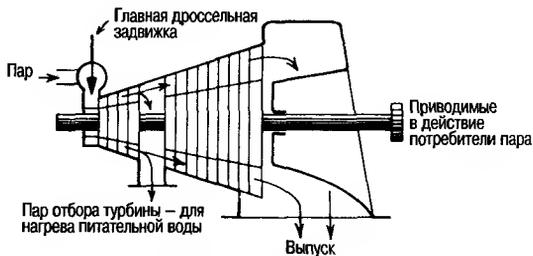


Рис. 39.47 Однократный неавтоматический отбор пара

ходить через турбину. Если выпуск пара из турбины происходит при давлении 100 фунтов/кв. дюйм, то проблема переноса диоксида кремния в более высоких концентрациях, чем те, которые рекомендованы в Таблицах 39.8 и 39.9, не возникает. Зависимость между концентрацией диоксида кремния в котловой воде и в паре тщательно изучена, поэтому можно заранее определить участок, где возможна сублимация диоксида кремния.

Отложения в турбинах могут быть образованы как органическими веществами, содержащимися в котловом паре, так и неорганическими веществами. Обычно они образуются вследствие утечек технологических сред в систему кон-

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

денсата, но причиной их образования может быть и состав воды из водного источника, содержащей либо органические вещества природного происхождения, либо органические соединения, попадающие в воду при сбросе в водный источник сточных вод промышленных предприятий или городских станций очистки сточных вод.

Существует много других областей применения пара в промышленном производстве. Во многих заводских цехах пар используется для приведения в действие ковочных машин, молотов и прессов. Для паровых цилиндров обычно требуется насыщенный или слегка влажный пар, их смазывают маслом специального состава, поэтому на таких заводах в отработавшем паре и конденсате обычно обнаруживают масло. Для создания вакуума, необходимого для выполнения различных операций, например, дегазации стали и перегонки тяжелых углеводородных фракций, часто применяются пароструйные эжекторы с барометрическими конденсаторами.

### **СИСТЕМЫ ВОЗВРАТА КОНДЕНСАТА**

---

Конденсат, получаемый при использовании пара в любом технологическом процессе, редко охлаждают до температуры, которая намного ниже температуры пара. Так как конденсат имеет высокую температуру, близкую к температуре пара, то следует уделить особое внимание выбору системы сбора конденсата и трубопроводов для его передачи. Диаметр трубопровода должен быть больше диаметра трубопровода для холодной воды, так как в результате падения давления может произойти мгновенное испарение проходящего по нему конденсата, закупоривание трубопровода и ограничение потока. Сбор конденсата может осуществляться при помощи насоса для нагнетания в наиболее подходящую для возврата точку или же может быть передан в точку с более низким давлением просто за счет градиента давления.

Конденсат турбины обычно собирают в конденсатоотводчик (сборник горячего конденсата), где поддерживают уровень, обеспечивающий соответствующую высоту столба жидкости над всасывающим патрубком насоса, перекачивающего конденсат турбины к деаэратору. Уровень конденсата в конденсатоотводчике поддерживают путем возврата части нагнетаемой насосом жидкости, в зависимости от колебаний нагрузки.

Конденсат технологического процесса также обычно возвращают насосами в деаэрирующий нагреватель. Технологический конденсат поступает в сборники конденсата; уровень конденсата в них регулируется таким образом, чтобы насос для горячего конденсата имел соответствующую высоту всасывания. Но даже в этом случае, для перекачивания горячего конденсата обычно требуются центробежные насосы специальной конструкции. Системы конденсата могут быть довольно сложными, как, например, на бумажной фабрике, где конденсат, образующийся при работе сушильных цилиндров с большой силой прижима, в системе конденсата может мгновенно испариться, образуя пар низкого давления, и затем подаваться к другому сушильному цилиндру. Конденсат ступенчатых нагревателей обычно подается самотеком, возвращаясь в нагреватель на ступень более низкого давления, в деаэратор или даже в конденсатоотводчик конденсатора.

После сбора конденсата следует правильно определить место для его возврата. На электростанции общего пользования весь поток конденсата перед возвратом его в деаэрирующий нагреватель можно направлять на очистку в ионообменную систему определенного типа. На промышленных предприятиях, если конденсат загрязнен, то перед возвратом в деаэратор, его подают на очистную установку. В большинстве случаев конденсат возвращают в деаэрирующее устройство, так как он может содержать растворенный кислород и другие газы; однако, возвратный конденсат высокого давления, не содержащий рас-

творенный кислород, может подаваться непосредственно в сборник деаэрирующего нагревателя для мгновенного испарения и подачи пара для процесса деаэрации.

В большинстве случаев для изготовления системы обработки конденсата применяют стандартную углеродистую сталь, хотя рабочие колеса насосов, металлические части арматуры и трубы теплообменника обычно изготовлены из медных сплавов. Поскольку конденсат обычно имеет высокую температуру, то в присутствии коррозионно-активных добавок, скорость коррозии, как правило, выше той, которая, предположительно, имела бы место в холодной воде. Вещества, вызывающие коррозию, это, в основном, - углекислый газ и кислород. Углекислый газ обычно образуется при разложении компонентов, которые придают котловой воде щелочные свойства, а кислород может проникать в систему в результате подсоса воздуха или воды, содержащей растворенный кислород (например, уплотняющей жидкости насосов). При осмотре трубопроводов для конденсата можно легко определить причину коррозии, см. Рис. 39.48 и 39.49. Основная причина коррозии медных сплавов - присутствие аммиака в системах, содержащих  $O_2$  (Рис. 39.50).



Рис. 39.48 Точечная коррозия трубопровода для конденсата в результате воздействия кислорода и углекислого газа.



Рис. 39.49 Равномерная (сплошная) коррозия ниже уровня воды в трубопроводе для конденсата.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

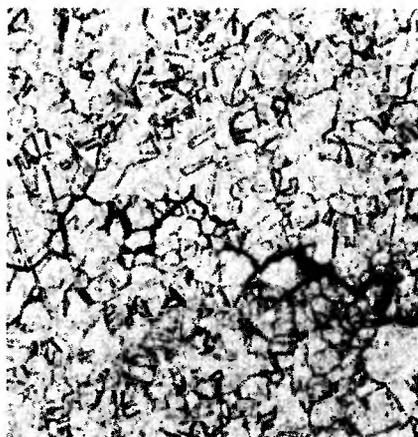


Рис. 39.50 Коррозия медного сплава в ступенчатом нагревателе в результате воздействия аммиака.

Без соответствующей обработки пара величина рН конденсата была бы низкой из-за присутствия диоксида углерода. Для борьбы с коррозией используют летучие щелочные амины, которые нейтрализуют угольную кислоту и, следовательно, повышают величину рН в системе. В герметичной системе для эффективной борьбы с коррозией часто бывает достаточно проведения процесса нейтрализации аминами. Однако многие системы работают в периодическом режиме или в режиме дросселирования (ограничения потока), в таких условиях возможен подсос кислорода. При высокой концентрации кислорода для защиты стальных трубопроводов от коррозии недостаточно проведения одной только нейтрализации. В таких случаях в пар добавляют летучие пленкообразующие амины, которые после конденсации образуют на поверхности металла пленку восковидного вещества и тем самым обеспечивают барьер между потоком конденсата и стенкой трубопровода, препятствуя таким образом развитию коррозии. На Рис. 39.51 показано действие пленкообразующих ингибиторов коррозии в системе конденсата.

Для коррекции величины рН и удаления кислорода могут использоваться гидразин и другие летучие поглотители растворенного в воде кислорода, однако при высоких концентрациях диоксида углерода и кислорода, какие часто имеют место во многих промышленных процессах, этот способ становится неэкономичным.

На установках, где вода содержит загрязняющие примеси в больших количествах, необходимо определить их источник и устранить причину. Загрязняющие примеси могут появиться, например, при использовании пара для получения горячей воды при помощи теплообменника. Для промышленного процесса может потребоваться горячая вода с определенной температурой, например, 150°F, и в трубопровод для подачи воды устанавливают термозлемент для регулирования расхода пара, поступающего в теплообменник в соответствии с расходом воды и температурой на выходе. При низком расходе воды, когда потребность в паре невелика, при регулировании расхода пара через паровой впускной клапан с помощью дросселя в паровом пространстве фактически возможно создание вакуума. Эти системы в большинстве случаев рассчитаны для работы под давлением и в условиях вакуума часто происходит подсос воздуха. Если в системе такого типа проводится нейтрализация аминами, то нетрудно определить место подсоса, так как воздух в атмосфере промышленного производства будет иметь доста-



Рис. 39.51 Пленкообразующие ингибиторы коррозии покрывают трубопровод конденсата несмачиваемой пленкой, защищая поверхность металла от коррозионного разрушения.

точно высокую концентрацию углекислого газа, что приведет к уменьшению величины рН конденсата на этом конкретном участке. Таким образом, для определения места подсоса воздуха на комплексной промышленной установке следует произвести отбор проб конденсата из всех источников и сравнить величину рН пробы конденсата с величиной рН пробы конденсированного пара или пробы того конденсата, который не содержит атмосферных загрязнений.

В случае обнаружения коррозии медного сплава в результате воздействия аммиака использование пленкообразующих ингибиторов обычно помогает предотвратить ее дальнейшее развитие благодаря защите поверхности от контакта с  $O_2$ . При высокой концентрации аммиака следует предусмотреть меры по ее снижению в системе предварительной обработки.

### Нейтрализующие амины

Наиболее часто используемыми нейтрализующими ингибиторами являются такие амины, как морфолин, циклогексилламин и диэтиламинэтанол. Способность каждого из вышеуказанных продуктов к распределению в конденсате или водной фазе характеризуется коэффициентом распределения "пар - жидкость". Этот коэффициент распределения показывает концентрацию амина в паровой фазе в сравнении с концентрацией его в водной фазе.

Для нейтрализации угольной кислоты амин должен присутствовать в водной фазе. Коэффициент распределения показывает, в какой фазе предпочтительно происходит распределение амина - в водной или паровой. Например, тетрагидрооксазин, предпочитающий водную фазу, будет присутствовать в первоначально образовавшемся конденсате при высоких температурах. В отличие от него, циклогексилламин имеет тенденцию оставаться в паровой фазе и поступать в конденсат после снижения температуры.

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Продукт	Коэффициент распределения "пар- жидкость"*
Тетрагидрооксазин (морфолин)	0,4 - 1
Циклогексилламин	4,0 - 1
Диэтиламинэтанола	1,7 - 1

\* при атмосферном давлении.

Поскольку амины имеют неодинаковые коэффициенты распределения "пар - жидкость", можно использовать сразу два или несколько различных аминов, для того чтобы обеспечить эффективную нейтрализацию в сложных системах.

Нейтрализующие амины добавляют в питательную воду после деаэрации, верхнего разделительного барабана котла или парового коллектора. Путем текущего контроля величины рН проб возвратного конденсата, отбираемых в начале, в середине и в конце системы конденсата, определяют, как протекает процесс нейтрализации.

### Пленкообразующие ингибиторы

Ингибиторами, которые используются для образования пленки в конденсатных системах, являются амины, молекулы которых имеют вид цепей. Один конец каждой молекулы - гидрофильный, а другой конец - гидрофобный. Гидрофильный конец закрепляется на поверхности металла, а другой конец отталкивает воду. При скоплении молекул на поверхности она становится несмачиваемой. Таким образом, пленка создает барьер, защищающий металл от коррозии при контакте его с водой, содержащей диоксид углерода, кислород, или аммиак. Так как молекулы также отталкивают друг друга, они не имеют тенденции к образованию слоев или пленок большой толщины. Они образуют мономолекулярную защитную пленку.

Пленка толщиной в одну молекулу фактически улучшает теплопередачу в конденсаторах, сушилках и другом теплообменном оборудовании. В результате ускорения капельной конденсации исключается образование изолирующего водного слоя между водой и поверхностью металла.

Для профилактики ручистой коррозии вследствие воздействия конденсата первостепенное значение имеет хорошее распределение пленкообразующих ингибиторов. Надежная защита может быть обеспечена только при наличии сплошной пленки. Поскольку эта пленка может быть смыта паром и конденсатом, ее следует постоянно восстанавливать путем непрерывной подачи ингибитора.

Первыми химикатами, которые были использованы в системах пар - конденсат в качестве пленкообразующих ингибиторов, были октадециламин и некоторые его соли. Однако из-за их воскообразного характера (независимо от того, поставлялись ли они в виде хлопьев или в виде эмульсии), трудно было приготовить необходимые для ввода однородные растворы этих химикатов. Для того чтобы октадециламин мог образовать пленку, сохраняющуюся на поверхности металла, величина рН конденсата должна изменяться в сравнительно узких пределах - от 6,5 до 8,0. Для устранения этих ограничений, в качестве альтернативы октадециламину, для условий котельных установок была разработана специальная молекулярная формула.

Многие пленкообразующие ингибиторы обычно подают в паровой коллектор, хотя их можно добавлять и в питательную воду, и в барабан котла; однако в этих случаях имеют место некоторые потери продукта при частичном отводе воды. Если защита необходима только технологическому оборудованию, то удобно добавлять ингибитор в воду, используемую для понижения температу-

ры перегретого пара, в коллектор технологического пара. Однако, независимо от места ввода для получения оптимальных результатов необходима непрерывная подача ингибитора. Дозировка не зависит от содержания кислорода или диоксида углерода в паре. Требуемое количество ингибитора определяется в зависимости от площади поверхности системы. Образование пленки, обеспечивающей надежную защиту, это - физический процесс, который в большой степени зависит от объемной скорости потоков, способа подачи и методики контроля.

## **ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ**

---

Существует несколько хороших способов для определения степени коррозии системы и эффективности применяемой программы предотвращения коррозии. Поскольку для этого необходимо проведение тщательного текущего контроля, очень важно проводить отбор проб на критических участках системы, используя при этом соответствующие средства. В трубопроводе должна быть установлена полая катушка, выступающая в проходящий поток; проба, взятая вдоль стенки трубопровода, не является представительной. В качестве пробоотборных линий должны использоваться трубопроводы из нержавеющей стали.

1. Мониторинг величины pH: имеется в виду контроль величины pH на всех участках системы, который необходим, чтобы убедиться в том, что:
  - a. амин добавляется в количестве, достаточном для нейтрализации диоксида углерода;
  - b. выбор сделан правильно и используется амин, обеспечивающий полную защиту системы;
  - c. отсутствуют примеси технологических сред или подсос воздуха.

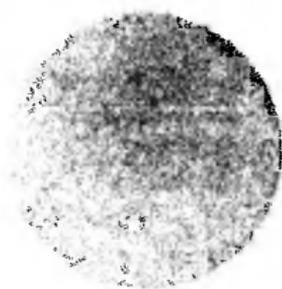
При отборе проб конденсата, во избежание отгона диоксида углерода и получения неправильных данных, пробу до контакта с атмосферой следует охладить. Для этого необходимо использовать охладитель проб, закрепленный на конденсаторопроводе. Расход при отборе пробы можно регулировать с помощью дросселя на выходе, но не на входе. Это препятствует созданию вакуума в змеевике и всасыванию воздуха, что приведет к получению ошибочных результатов. В случае неправильной установки охладителя будут получены неточные результаты, вводящие в заблуждение.

2. Мониторинг электропроводности: электропроводность возвратного конденсата может быть индикатором присутствия загрязняющих примесей технологических сред и коррозии.
3. Проверка на присутствие диоксида углерода: оценка проблемы коррозии может быть сделана непосредственно путем измерения содержания диоксида углерода в конденсате.
4. Жесткость: Аналогично измерению электропроводности, определение жесткости может служить индикатором присутствия загрязняющих примесей технологических сред, в частности, вследствие утечек охлаждающей воды.
5. Испытательные трубки: использование испытательных трубок, установленных в паропроводах или конденсаторопроводах, обеспечивает возможность проведения визуального контроля состояния системы и определения степени коррозии.

Трубка может быть взвешена в начале и в конце периода испытаний с целью определения потери веса вследствие коррозии.

6. Образцы для испытаний: Такие образцы также используются для оценки степени рывистой коррозии при воздействии конденсата. Предварительно взвешенные образцы для испытаний в специальных держателях вставляются в

10



25



50



75



100

250

500

1000

Рис. 39.52 Содержание оксида железа в частях на миллиард можно определить методом последовательных приближений при помощи карты для сравнения. Пробу воды объемом 1 литр пропустили через мембранный фильтр 0,45 мкм; затем было проведено сравнение с цветовыми эквивалентами, представленными на карте.

конденсатопроводы. По истечении произвольно выбранного периода времени (обычно не менее 30 дней) образцы удаляют, очищают и повторно взвешивают. Если известна площадь поверхности образца и время воздействия, то на основе разности в весе образца в начале и в конце испытаний можно определить скорость потери металла вследствие коррозии. Однако, следует отметить, что при помощи таких образцов для испытаний обычно невозможно определить степень коррозии бороздками в нижней части и коррозии резьбовых соединений в случае появления коррозии такого типа в трубопроводе.

7. Анализ на содержание продуктов коррозии (железа и меди) в конденсате является наиболее популярным и широко применяемым способом наблюдения за развитием коррозии. Так как металлы, являющиеся продуктами коррозии, в основном, присутствуют в конденсате не в растворенном виде, а в виде нерастворимых макрочастиц, важно применять такие методы отбора проб, которые обеспечивают представительность и пропорциональность при улавливании макрочастиц.

Общее содержание продуктов коррозии в пределах от 0 до 50 мкг/л показывает, что система находится под контролем. Из-за возможных ошибок при измерениях при таком малом содержании макрочастиц необходимо проанализировать сравнительно большое число проб. При этом применяются два метода:

- a. Визуальное определение концентрации железа на основе изменения цвета мембранного фильтра, через который пропущен поток конденсата в известном объеме. Определение концентрации проводится путем сравнения прокладки мембраны после фильтрации пробы с заранее подготовленными стандартными прокладками, имеющими цветовые эквиваленты, соответствующие определенному содержанию железа (Рис. 39.52).
- b. Для очень точного количественного определения общего содержания железа и меди успешно применяется метод Analox. Этот метод заключается в том, что пробу конденсата в течение 7 - 30 дней пропускают через небольшой пластмассовый фильтрующий патрон, содержащий высокоэффективный фильтр из ионообменных материалов. Макрочастицы задерживаются фильтром, в то время как растворенные твердые вещества поглощаются в процессе ионного обмена. С помощью уникального лабораторного анализа рассчитывают общую массу каждого металла. Ряд последовательно проведенных анализов методом Analox дает полную и точную картину тенденции развития ручьистой коррозии при воздействии конденсата. Как правило, при использовании ингибиторов в системе, не прошедшей предварительную обработку, наблюдается временное повышение содержания продуктов коррозии в конденсате. Многие ингибиторы обладают "моющим эффектом" и имеют тенденцию избавляться от старых оксидов. При оценке результатов анализов это необходимо учитывать. На установке обычно применяют не один, а несколько методов текущего контроля (например, текущий контроль величины рН и образцы для коррозионных испытаний). Хотя при первоначальной разработке программы может показаться, что текущий контроль состава конденсата потребует слишком больших затрат времени, получаемые результаты вполне окупают эти затраты, так как при очень чистом возвратном конденсате, имеющем высокую теплопроводную способность, исключаются простои и обеспечивается экономия энергии.

## **ОБСЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОТЛА**

Цель обследования системы котла заключается в том, чтобы определить физические и химические параметры режима работы системы и их взаимосвязь с тех-

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

нологическими операциями, проводимыми на установке, с целью обеспечения работы системы с максимальным КПД при минимальном техническом обслуживании. Следует определить физические или механические параметры для различных типов оборудования системы: оборудования для водоснабжения и водоподготовки, установок, где используется пар, оборудования системы конденсата, вспомогательного оборудования котельной установки и самого котла. К ним относятся и данные о тепловом балансе. Химические данные включают данные анализов всех имеющих значение потоков воды - сырой воды, потоков конденсата; воды, прошедшей обработку; питательной воды котла, котловой воды и сточных вод. Необходимость сбора таких подробных данных объясняется тем, что каждая система котла уникальна, и стандарты, устанавливающие требования к оптимальным рабочим характеристикам, изменяются, когда добавляется новое оборудование, меняются источники водоснабжения и относительная стоимость топлива, основное оборудование и рабочая сила.

При проведении полного обследования энергоустановки необходимо просмотреть шесть конкретных источников информации:

1. Схема технологического процесса на энергоустановке.
2. Характеристики механического оборудования и систем водоснабжения, включая физические размеры и функциональные возможности.
3. Данные анализов и данные наблюдений за потоками пара и всех источников воды в системе котла, включая потоки сточных вод.
4. Характеристики всех химикалий, используемых для обработки, их расхода и подробные данные о местах их ввода.
5. Данные исследований на наличие отложений/коррозии при ранее проводившихся осмотрах оборудования.
6. Подробный отчет об осмотре котла с точки зрения использования воды и топлива.
7. Данные металлографических исследований любых повреждений металла в системе.
8. Регистрационные журналы оператора и отчеты о техобслуживании и ремонте.

### Схема технологического процесса на энергоустановке

На технологической схеме, показывающей энергоустановку и все ее узлы, прослеживается весь путь, который проходит вода от источника до системы питательной воды, где она смешивается с конденсатом, включая промежуточную систему предварительной обработки. На схеме показан путь питательной воды к котлам и распределение пара: пар для работы турбин и технологический пар. На технологической схеме показано все технологическое оборудование, в котором используется пар, и поток возвратного конденсата. На рис. 39.53, в качестве примера представлена схема энергоустановки. Примерно такая схема должна быть подготовлена или проверена экспертом при проведении инспекции на установке и беседах с производственным персоналом. Светокопии чертежей не могут дать точную картину на настоящий момент, так как многие из них были выполнены во время монтажа и, возможно, в них не были внесены изменения, сделанные после пуска.

В процессе разработки технологической схемы системы должны быть собраны необходимые для этой системы данные. На Рис. 39.54 представлена типичная форма представления данных обследования системы, которая была использована при регистрации данных о системе энергоустановки, показанной на Рис. 39.53.

При обследовании требуются данные последних анализов воды из всех источников питательной воды котла, включая сырую воду, воду после осветления

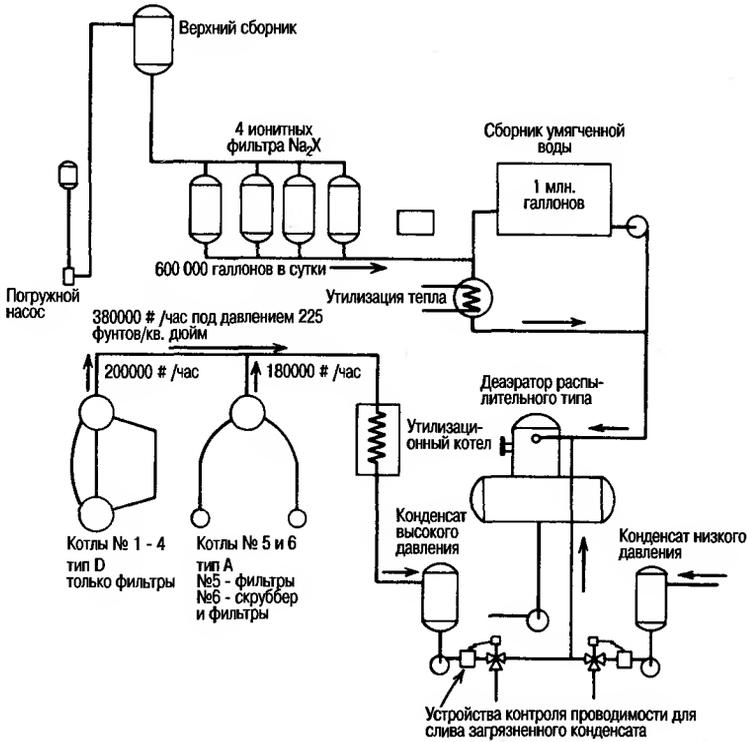


Рис. 39.53 Схема котельной промышленного предприятия, на которой показаны система предварительной обработки, использование технологического пара и система возврата конденсата.

и фильтрации, воду после обработки при помощи цеолитов, отдельные потоки возвратного конденсата и непосредственно питательную воду.

При принятии решения о том, в каком объеме следует проводить анализ каждой пробы, требуется определенная осведомленность. Если, например, из источника поступает окрашенная вода, но нет никаких подтверждений того, что на установке появились какие-либо проблемы из-за присутствия органических веществ, то нет необходимости проводить анализ на содержание органических веществ путем определения БПК, ХПК или общего содержания органического углерода (ТОС) в пробах, взятых в какой-либо точке отбора проб в трубопроводах подпиточной воды. При неожиданном повышении жесткости конденсата может потребоваться анализ проб, взятых в местах отбора проб конденсата, только для определения общей жесткости, содержания железа, величины pH и удельной проводимости. Места возможных нарушений в системе конденсата часто можно обнаружить путем фильтрации отдельных проб через мембранные фильтры и сравнения прокладок фильтра с прокладками фильтров, например, после фильтрации через них однородной пробы объемом 500 мл.

С другой стороны, может появиться необходимость в проведении довольно сложного анализа конденсата, отводимого в канализацию, с целью определения возможности его использования в качестве питательной воды котла. Кон-



**ОТБОР ПРОБ ПАРА**

Наибольшие трудности возникают при отборе проб самого пара, так как получить представительную пробу, не обеспечив специальных условий для пробоотбора, очень трудно. На Рис. 39.55 показана рекомендуемая схема отбора проб пара и его конденсации для последующего проведения анализа. При анализе может потребоваться только определение величины рН для установления концентрации, полученной при использовании нейтрализующего амина в качестве базы для сравнения при определении величины рН проб конденсата. С другой

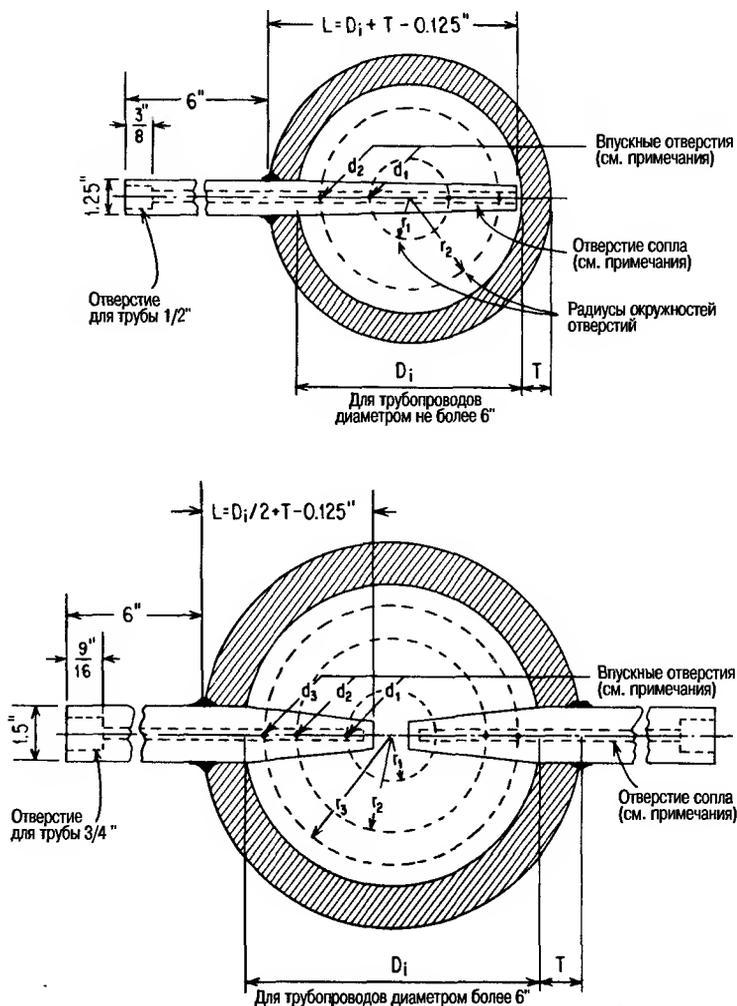


Рис. 39.55 Рекомендуемая схема отбора проб насыщенного пара с целью контроля его качества. Требуется модификация сопла для перегретого пара, чтобы обеспечить рециркуляцию части конденсированной пробы для охлаждения после перегрева. (Из *ASTM Standard Method D 1066-69.*)

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

стороны, отбор проб пара имеет первостепенное значение для установления причин нарушений в работе системы.

Путем анализа пара на содержание водорода можно определить скорость коррозии в котле с учетом паропроизводительности. Причина выделения водорода - наличие активных коррозионных элементов или химическое разложение. Эти анализы должны проводиться опытными специалистами, чтобы была возможность правильной интерпретации полученных данных. На Рис. 39.56 представлены данные анализатора водорода (Рис. 39.6) для определения уровня концентрации водорода в паре, полученном в котле, питательная вода которого содержит загрязняющие примеси технологических сред. Коррозионное действие в пределах котла вследствие разрушения защитного слоя магнетита стало причиной выделения водорода непосредственно в результате коррозии котельной стали, что четко видно на графике, полученном при помощи анализатора.

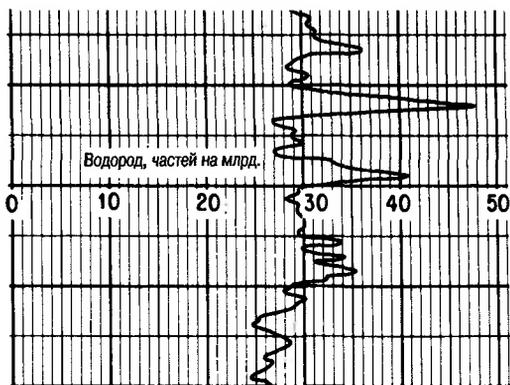


Рис. 39.56 Кривая содержания растворенного водорода в паре из промышленного котла, работающего под давлением 250 фунтов/кв. дюйм. После тщательного исследования было установлено, что периодически происходит загрязнение конденсата тетрахлорэтиленом, образующимся в котле в процессе гидролиза с образованием HCl и выделением водорода.

Качество пара обычно определяют при помощи ионообменного электрода, селективного по отношению к натрию. Так как растворенные в котловой воде соли являются солями натрия, присутствие натрия в пробе пара прямо указывает на наличие примесей в паре. На Рис. 39.31, рассмотренном выше, представлена кривая, полученная при таком анализе пара на установке, где в паре периодически обнаруживались примеси.

### **КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПАРА**

При проведении исследования с целью повышения КПД системы для производства пара особое внимание следует уделить двум основным технологическим операциям, при которых возможны потери воды, имеются в виду потери котловой воды при частичном сбросе и потери конденсата. Объем частичного сброса воды из котла может быть рассчитан на основе содержания в ней химических веществ. Потери конденсата будут представлять собой разность объемов подпиточной и питательной воды, определяемых путем измерения. Для определе-

ния фактического эксплуатационного кпд, разумеется, необходимо полное обследование котельной установки; факторами имеющими отношение к воде, обусловлена лишь часть потерь энергии. Типичные данные анализа потерь энергии на небольшой установке были представлены выше, в Табл. 39.11.

Для повышения кпд можно дать следующие рекомендации: изменение условий сжигания топлива в котле в целях уменьшения объема избыточного воздуха; уменьшение объема частичного сброса воды и разработка мер по увеличению объема возвратного конденсата либо путем очистки конденсата, либо просто путем возврата сбрасываемого в канализацию конденсата по трубопроводу.

## **АНАЛИЗ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ И ОТКАЗОВ**

Следующий шаг в ходе обследования - это сбор данных, полученных ранее при анализах отложений во время осмотров котла. В этом случае для принятия решения, какие анализы следует проводить, также требуется определенная осведомленность. Ранее в этой главе уже было указано, какие анализы обычно проводятся. В большинстве случаев для оценки проблемы достаточно проведения химических анализов, но иногда может потребоваться кристаллографическое исследование для изучения кристаллической структуры путем рентгеновского анализа. В Табл. 39.12 представлены данные анализа отложений, полученные путем химического анализа и путем дифракции рентгеновских лучей. Большой объем информации может содержать запись наблюдений лаборанта, проводившего отбор проб. Описание физического внешнего вида пробы сразу после ее взятия в определенном месте может, например, представлять собой ценную информацию. Многие отложения имеют слоистую структуру, что указывает на периодические изменения водной среды, являющиеся причиной образования отложений. Если проблема потребует более кропотливого изучения, то путем

**Таблица 39.12** Данные исследования отложений бурого цвета, образовавшихся в верхнем разделительном барабане котла, полученные путем элементного анализа и дифракции рентгеновских лучей

Элементный анализ			
Неорганические вещества содержащиеся в высушенной пробе {в расчете на 100 %}		Расчетное содержание основных соединений (в весовых процентах)	
Железо (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	64	Общие потери при 800 °C	19
Магний (MgO)	10	Оксид магнитного железа	51
Кальций (CaO)	8	Силикат магния	13
Кремний (SiO <sub>2</sub> )	8	Основной фосфат кальция	8
Фосфор (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) 4		Сульфат кальция	4
Сера (SO <sub>3</sub> ) 4		Сульфат магния	2
Марганец (MnO <sub>2</sub> )	1	Оксид магния 1	
Карбонат (CO <sub>2</sub> )	0		

Нижесказанные элементы не были обнаружены (за пределами обнаружения): Na, Al, Cl, K, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Sn, Ba, Pb.

Потери при 800°C: 19 %; экстракция CHCl<sub>3</sub>: 0 %.

### Рентгенографический анализ

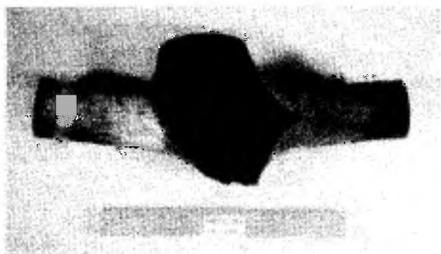
Дифракция рентгеновских лучей указывает присутствие следующих веществ:

Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Магнетит
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Гематит
MgO	Периклаз (вероятность присутствия)
Ca (OH) <sub>2</sub> ·3Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	Гидроксилапатит (возможность присутствия)

## ОБРАБОТКА КОТЛОВОЙ ВОДЫ

анализа отдельных слоев можно сделать ретроспективный анализ причин изменения условий окружающей среды. Если отложения обнаруживаются в трубах пароперегревателя, часто достаточно просто выяснить, растворимы ли эти отложения в воде. Таким образом, в вопросе о том, что фактически требуется при проведении анализов отложений, обнаруживаемых на разных участках контура воды, решающим является мнение эксперта.

Металлографическое исследование образцов поврежденных труб, деталей насосов или технологического оборудования - эффективный способ определения причины повреждения, обеспечивающий возможность устранения этой



(a)



(b)



(c)

Рис. 39.57 (a) Разрыв трубы пароперегревателя. (b) Изменение обычной перлитной структуры (Рис. 39.2) из-за перегрева (c) Структура металла после закалки в результате охлаждения металла из-за разрыва трубы.

причины путем внесения в программу соответствующих изменений. Необходимо иметь полную информацию о поврежденном участке, в том числе, информацию о местоположении этого участка в контуре циркуляции котла или в технологическом оборудовании и об основных условиях эксплуатации в период появления повреждения. Металлографическое исследование включает проведение анализа всех обнаруженных на образце отложений с целью установления причины повреждения. На Рис. 39.57 (а) показан поврежденный участок трубы пароперегревателя. Участок трубы на противоположной поврежденному участку стороне имеет обычную (перлитную) структуру. На второй части рисунка (b) можно видеть изменение структуры металла в условиях перегрева, а на третьей части (с) - структуру металла после его разрушения, когда после прорыва пара в месте разрыва трубы фактически произошло охлаждение перегретого металла. Такое быстрое охлаждение способствовало закалке перегретого металла с образованием кристаллической структуры, изображенной на третьей части Рис. 39.57. Причиной разрыва трубы явилось постепенное накопление отложений в трубе пароперегревателя вследствие неправильных действий при выводе котла из эксплуатации. Во время простоя началась коррозия внутренних поверхностей трубы; на них образовался изолирующий слой из продуктов коррозии, снижающий интенсивность теплопередачи, что, в конечном счете, стало причиной разрыва трубы.

В заключение эксперт должен просмотреть все операционные карты технологического процесса и акты осмотра системы. Они должны содержать записи, сделанные операторами установки в процессе ежедневных наблюдений и отражающие нормальные условия эксплуатации и отклонения от нормального режима работы, а такие события, как, например, неоднократный отказ химического насоса, могут дать очень важную информацию при выяснении причин возникновения проблем на установке. Если на установке имеется консультант по котловой воде, то обычно составляются подробные протоколы проведенных им консультаций; при обследовании эти протоколы являются еще одним источником информации. Услуги такого рода необходимы не только для проверки правильности проведения операторами текущих химических анализов, но и для получения рекомендаций в отношении оптимизации технологических процессов, основанных на опыте и мнении специалиста, проводившего техническое обслуживание многих установок и способного дать рекомендации относительно непрерывного совершенствования установки на основе новейших мировых достижений в области очистки воды.

---

## ГЛАВА 40

---

# ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

---

В Соединенных Штатах Америки критерии качества сточных вод уже давно не являются предметом локальных соглашений между региональными законодательными органами власти и отраслями промышленности; они устанавливаются федеральными органами власти и закрепляются законодательством штатов. При выборе программы обработки сточных вод, сбрасываемых в водоприемник или озеро, сточные воды каждого конкретного предприятия должны рассматриваться отдельно, поскольку каждому такому предприятию требуется получить разрешение на сброс сточных вод от Управления по охране окружающей среды (EPA). Каждое предприятие получает индивидуальное разрешение потому, что характеристики сточных вод изменяются в широких пределах; даже в одной и той же отрасли промышленности; на заводах с той же самой производительностью и процессами могут образовываться сточные воды, резко отличающиеся как в качественном, так и в количественном отношении. Причиной таких различий может быть состав сырья, источники водоснабжения завода, прямая и оборотная вода, географическое расположение или срок службы оборудования.

---

### **ИСТОЧНИКИ СТОЧНЫХ ВОД**

---

Данные по расходу сырой воды не дают точной информации о количестве сточных вод, подлежащих обработке. В отдельные периоды потоки сточных вод завода могут составлять всего 10% от объема подаваемой на завод сырой воды или превышать его более чем 200%. Даже данные по среднесуточным значениям не являются показательными, так как объем сточных вод может составлять всего 20 % от забора сырой воды из-за потерь от испарения, или их объем может превышать объем поступившей на завод сырой воды в дождливый день (рис 40.1). Чтобы получить наиболее достоверную информацию для определения программы обработки и требований к пропускной способности оборудования, необходимо должным образом проанализировать все источники сточных вод конкретного завода.

Хотя ливневые стоки завода обычно рассматривают как незначительно загрязненные по сравнению с их первоначальным составом, такие стоки могут существенно увеличить объем сточных вод завода. На побережье Мексиканского залива США, где количество выпадающих осадков может превысить 60 дюймов (150 см) в год, заводы должны предусматривать очистку ливневых стоков на своих собственных очистных сооружениях. В других областях, климатические условия могут позволить сократить объем ливневых стоков за счет испарения. Ливневые сточные воды могут быть собраны в специальном водосборнике и использованы в качестве хорошего источника воды, так как содержание в ливневых стоках меньше по сравнению с сырой водой, поступающей на завод; следовательно, ливневые стоки могут принести и пользу. Например, нефтеперерабатывающий завод, расположенный на площадке в 500 ак-

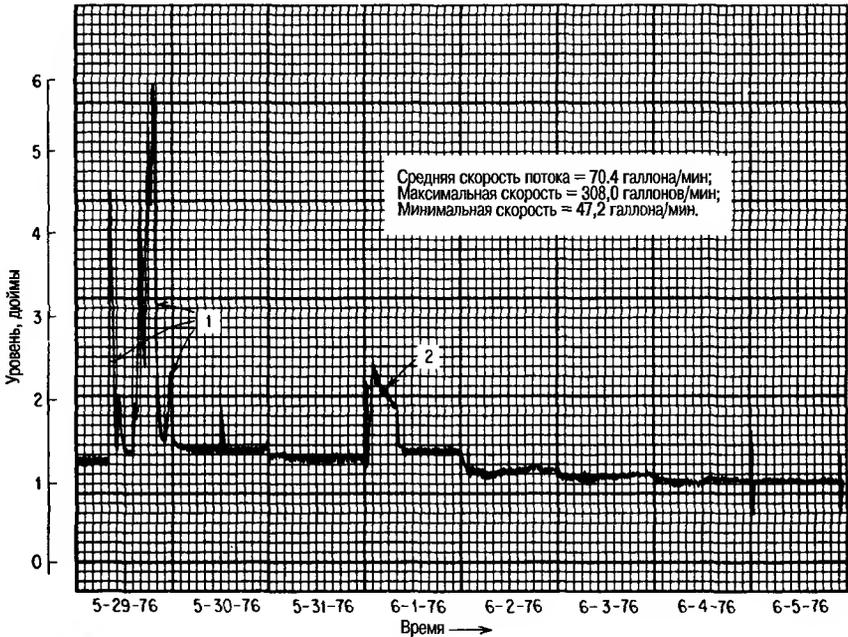


Рис. 40.1 Влияние количества выпадающих осадков на скорость потока сточных вод завода. Цифры 1 и 2 обозначают максимальную скорость потока, обусловленную количеством выпадающих осадков.

ров (200 га) в районе, где количество выпадающих осадков в год составляет 36 дюймов (90 см), обычно сбрасывает ливневые стоки в объеме 1,5 млн. гал/сутки (2,62 м<sup>3</sup>/мин.). Существенная часть этой воды может быть утилизирована, если предпринять соответствующие меры по сбору этих сточных вод в дождливое время года.

На количество сточных вод также оказывает влияние процесс просачивания почвенных вод в канализационную систему, особенно, в дождливое время года. Если коллекторы находятся ниже поверхности грунтовых вод или вблизи мест, где расположено ложе потока, то почвенные воды будут постоянно попадать в такие коллекторы в местах негерметичных соединений, через плохо закрытые колодцы или крышки люков. На морском побережье на скорость просачивания почвенных вод могут влиять приливы и отливы. Скорость просачивания почвенных вод может изменяться в пределах от 15000 до 50000 галлонов/сутки/милю (от 35 до 120 м<sup>3</sup>/ км) длины коллектора.

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СТОЧНЫЕ ВОДЫ И СТЕПЕНЬ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

Потоки сточных вод всего предприятия обычно определяются путем анализа сточных вод отдельных технологических процессов. Технологическая вода может использоваться для проведения таких операций как мойка, промывка, охлаждение путем непосредственного контакта с водой, подпитка растворов, а также в ходе химических реакций, в процессе конденсации и очистки газа. Технологические сточные воды обычно создают наибольшую нагрузку на очист-

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

ные сооружения, поскольку представляют собой наиболее загрязненные сточные воды предприятия. Причина этого заключается в незапланированных утечках оборудования и попадании в воду технологической жидкой среды. Технологические сточные воды, сбрасываемые отдельными ее потребителями в внутри предприятия, могут содержать загрязняющие примеси, не подлежащие направлению в систему химической обработки промышленно-муниципальных сточных вод. В табл. 40.1 приведен пример технологических сточных вод предприятий различных отраслей промышленности, в которых имеет место увеличение концентрации солей, а также присутствие загрязняющих примесей, характерных только для данной отрасли промышленности.

Причиной загрязнения могут быть разливы или утечка технологической среды при проведении производственных операций. Объем сточных вод, загрязненных такими проливами, обычно меньше по сравнению с суммарным объемом использованной воды, однако вследствие высокой концентрации загрязняющих веществ, их попадание в систему канализации часто отрицательно сказывается на реализации программы химической очистки сточных вод. Аналогично этому, необходимо тщательно следить за хранением и транспортировкой сырья или продукции - как потенциальных источников загрязнения. При анализе сточных вод необходимо взять за основу предположение о том, что сырье или производимая в ходе технологического процесса продукция могут так или иначе попасть в канализационную систему, и, если эти материалы представляют собой нежелательные загрязняющие вещества, то необходим анализ сточных вод на их содержание.

Источником концентрированных сточных вод могут быть операции по очистке и ремонту оборудования, емкостей, автоцистерн или автомобилей в ходе их технического обслуживания.

**Таблица 40.1** Перечень процессов, способствующих повышению содержания солей в технологических сточных водах

Промышленность	Процесс
Целлюлозно-бумажная	Беление, промывка целлюлозы
Нефтяная	Обессоливание сырой нефти
Сталелитейная	Очистка доменного газа
Коксохимическая	Конденсация влаги из угля
Текстильная	Мойка волокна или шерсти
Пищевая	Снятие кожуры, промывка, очистка
Машиностроение	Промывка, управление распылением при окраске
Все отрасли промышленности	Программы химической обработки воды, в результате которых образуются сточные воды с высокой концентрацией химических веществ (например, ионный обмен, обратный осмос)

## СИСТЕМЫ ВОДО-, ТЕПЛО- И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Дополнительные сточные воды образуются при подготовке сырой воды для водо-, тепло- и энергоснабжения предприятия. На установке для подготовки такой воды необходимо удалить из нее взвешенные или растворенные твердые вещества, а также химические вещества, введенные для ее химической обработки. Такие сточные воды могут сбрасываться непрерывно или периодически в канализационную систему предприятия после прохождения через осветлители, фильтры и водоумягчители.

Системы водо-, тепло- и энергоснабжения предприятий сбрасывают воду в меньшем количестве по сравнению с ее забором. Водяной пар теряется в атмо-

сферу, однако, самые большие потери от испарения происходит в градирнях, представляющих главный источник отвода тепла. Для контроля за образованием нежелательных загрязняющих веществ в системах водоснабжения, обусловленным процессами испарения, в системах водо-, тепло и энергоснабжения предусмотрен частичный сброс воды из котлов или систем водяного охлаждения. Объем такого частичного сброса может составлять только от 5 до 10 % от объема подпиточной воды, добавляемой в котлы или системы водяного охлаждения для компенсации такой большой разницы между забором воды и ее сбросом. Такой частичный сброс способствует снижению концентрации солей в сточных водах, возросшей в процессе испарения, а также содержит химические вещества, добавленные в нее для борьбы с коррозией, накипеобразованием и загрязнением систем. Типичный водный баланс нефтеперерабатывающего завода, имеющего систему испарительного охлаждения, показывает потери воды от испарения в объеме 60 - 80%..

И, наконец, на предприятиях имеют место санитарно-бытовые стоки, источником которых являются пищеблоки и туалетные комнаты. Если такие стоки не направляются на муниципальные очистные сооружения, то необходимо предусмотреть их обработку на водоочистных сооружениях предприятия.

### **ПЛАНИРОВАНИЕ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА КОНКРЕТНОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

---

Планирование программы обработки промышленных стоков начинается с рассмотрения генерального плана завода и схемы его канализационной системы. Генеральный план содержит общую информацию: размер предприятия, склады сырья, промежуточной и готовой продукции производственных цехов, материалопроводы, система водоснабжения и площадки, куда отводятся сточные воды. Чертежи канализационной системы показывают расположение самого коллектора, а также люков, спускных отверстий в полу, отдельных систем сбора сточных вод, сливных труб и дренажных отверстий для ливневых стоков, а также любых других действующих узлов очистки сточных вод. Эти чертежи и схемы, а также имеющиеся в распоряжении данные о количестве выпадающих осадков, дают представление о нагрузке на канализационную систему предприятия, с учетом и ливневых стоков и сточных вод предприятия.

Ценная информация о наличии загрязняющих веществ в сточных водах может быть получена путем просмотра отчетов о заказах на поставку, списков химических веществ, используемых для производства продукции, а также самой конечной продукции. Расхождения между поступающим сырьем и конечной продукцией дает возможность оценить тип и вероятное количество загрязняющих примесей, которые могут присутствовать в сточных водах этого предприятия (см. табл. 40.2). При рассмотрении списка химических веществ, используемых на предприятии и, скорее всего, присутствующих в определенных периодах в сточных водах, группа экспертов, продельвающих эту работу, должна обратить особое внимание на токсические вещества, включенные Управлением по охране окружающей среды (EPA) в список "наиболее приоритетных загрязняющих веществ". Если загрязняющие вещества, включенные в этот список, имеются на предприятии, то потребуются обязательный анализ на их содержание в сточных водах предприятия. При любой программе химической обработки, выбранной для конкретного предприятия, потребуются сведения этих загрязняющих веществ к минимально допустимому уровню, - и этот уровень может быть таким, что его невозможно обнаружить при помощи современных методов аналитического контроля. В табл. 40.3 приведен список наиболее приоритетных токсических загрязняющих веществ, подготовленный Управлением EPA, наличие которых нужно выявить в первую очередь в ходе анализа сточных вод предприятия.

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Необходимо рассмотреть возможность осаждения отработанных химических веществ в канализационной системе предприятия, а также систему мероприятий, направленных на предотвращение такого осаждения.

После рассмотрения чертежей необходимо посетить цеха и проверить производственное оборудование. При этом особое внимание следует обратить на использование воды в каждом конкретном процессе и на образующиеся в итоге сточные воды для того, чтобы идентифицировать те проблемы, которые не были выявлены в ходе рассмотрения чертежей. Использование воды в избыточном количестве, неправильное управление, плохое ведение хозяйственных дел, а также неудовлетворительное состояние оборудования - обычные примеры факторов, способствующих загрязнению технологических сточных вод. Такие проверки выявляют возможность принятия коррективных действий и намечают способы предотвращения загрязнения сточных вод непосредственно у источника, а не способы удаления этих загрязняющих веществ "постфактум" уже из сточных вод предприятия. Наиболее важным моментом при разработке программы сведения к минимуму выбросов загрязняющих веществ является проведение соответствующего инструктажа рабочих и служащих, аналогичного инструктажу по соблюдению техники безопасности на производстве. Для успешного выполнения таких программ безопасности производственного процесса необходимо постоянное напоминание рабочим и служащим о наличии проблемы, например, в форме наклеивания предостерегающих эмблем или проведения курсов обучения.

При посещении цехов необходимо также проверить действующее оборудование, используемое для обработки сточных вод, для получения информации об его размерах и эксплуатационных характеристиках. На некоторых предприятиях, работа в ночную смену может отличаться от работы в дневную смену, поэтому необходимо проводить такие проверки и в дневные и в ночные смены.

**Таблица 40. 2** Перечень сырья, используемого на небольшом заводе, производящем химические вещества для текстильной промышленности\*

---

Кислоты (серная, стеариновая, олеиновая)
Стеарат алюминия
Спирты (изопропиловый, метиловый, бутиловый)
Бутил карбитол
Хлорированные фенолы
Формальдегид
Керосин
Нефтепродукт
Моноэтанолламин
Масло (скипидар, арахисовое, касторовое)
Полиэтилен
Хлористый натрий, перборат, триполифосфат, гидроокись
Мыльные хлопья, солидол, порошок, тапиока, воск (нефтяной и синтетический)

---

\* Эти химические вещества включают моющие средства, умягчители, смачивающие реагенты и клеи. Все они - потенциальные загрязняющие вещества сточных вод.

## **ОЦЕНКА ПОТОКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ИХ КАЧЕСТВА**

---

Один из самых важных моментов заключается в необходимости постоянной регистрации объемов сточных вод, требующих очистки. Необходимо измерить объем стоков со всего предприятия, а также от индивидуальных технологических процессов. Для измерения объема сточных вод со всего предприятия, на многих из таких предприятий установлены постоянные расходомеры. Однако, необходимы также и измерения потоков сточных вод от отдельных технологи-

ческих процессов. Чтобы получить реальные данные по потокам, требующим очистки, измерения следует проводить в течение достаточно продолжительного периода времени, чтобы понять, какие изменения в объемах сточных вод необходимо учесть при их обработке на очистных сооружениях. (Рис.40.2). (См. Главу 7 "Измерение расхода").

**Таблица 40.3** Токсические загрязняющие вещества, включенные в список EPA\*

1. Элементы и их соединения (органические и неорганические)	ДДТ и продукты обмена веществ Дихлорбензол Дихлорэтилен Дихлорпропан и пропен Дифенилгидразин Эндосульфат и продукты обмена веществ Эндрин и продукты обмена веществ Этилбензол Фторантен Галозфиры Галометаны Гептахлор и продукты обмена веществ Гексахлорбутадиев Гексахлорциклогексан Гексахлорциклопентадиен
2. Неорганические соединения	Изофторан
Асбест (минерал)	Нафталин и хлорированный нафталин
Цианиды	Нитрозамины
3. Органические соединения	Фенолы, хлорированные фенолы, нитрофенолы, и 2,4-диметилфенол Сложные эфиры фталата Полихлорированные бифенилы (PCB) Многоядерные ароматические углеводороды 2,3,7,8-тетрахлородибензо-р-диоксин (TCDD) Тетрахлорэтилен Толуол и динитротолуол Токсафен Трихлорэтилен Хлористый винил
Аценафтен	
Акролеин	
Акрилонитрил	
Аидрин/дильдрин	
Бензол, хлорированный бензол, и нитробензолы	
Бензидин	
Тетрахлорид углерода	
Хлордан и продукты обмена веществ	
Хлорированные этаны	
Эфиры хлористого алкила	
Хлороформ	

\* В этот список вносятся постоянные изменения и в случае использования его необходимо сверить с окончательным вариантом.

Для выбора наиболее оптимальной программы химической обработки, прежде всего, следует определить химические характеристики сточных вод и предельно допустимые концентрации (ПДК) присутствующих в них загрязняющих примесей. Эти характеристики находятся в непосредственной зависимости от качества подаваемой сырой воды, от концентрации в ней солей после ее использования в системе водо-, тепло- и энергоснабжения, от загрязняющих примесей, попавших в воду в ходе технологических процессов, а также от химических веществ, используемых в качестве сырья для производства продукции. В дополнение к загрязняющим веществам, присутствующим в используемом сырье, в воду могут поступать другие загрязняющие примеси, как побочные продукты процессов, или как следы примесей в сырье. Для каждой отрасли промышленности характерен свой собственный профиль сточных вод. Например, для сточных вод нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также для производств железа и стали, характерно содержание солей цианистово-

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

дородной кислоты, фенолов, аммиака, и сульфидов, которые присутствуют в водах в различных концентрациях и отношениях. Руководства по определению наиболее вероятных загрязняющих примесей в промышленных сточных водах содержатся в многочисленных исследованиях, финансируемых Управлением по охране окружающей среды, цель которых заключается в установлении конкретных ПДК для стоков по каждой отрасли промышленности. Некоторые из этих данных представлены в табл. 40.4.

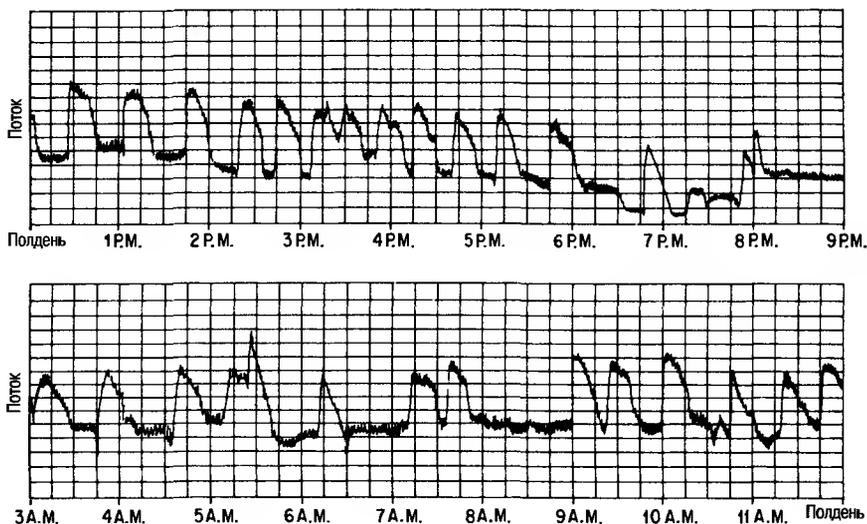


Рис. 40.2 Изменения в объеме сточных вод вследствие циклической работы предприятия.

## ОТБОР ПРОБ И ИХ АНАЛИЗ

После выяснения того, на содержание каких загрязняющих примесей необходимо проводить анализ сточных вод предприятия, т.е. как сточных вод отдельных технологических процессов, так и сточных вод всего предприятия в целом, можно приступить к определению нагрузки на очистные сооружения. При отборе проб необходимо установить средний объем сточных вод, содержащих загрязняющие примеси, максимальный объем сточных вод при циклической или периодической работе завода, а также технологические переменные. Для определения изменений в характеристиках сточных вод, в дополнение к отбору проб необходимо также проводить постоянный текущий контроль значений pH, температуры и электропроводности (рис. 40.3). Кроме этого необходимо также взять пробы сточных вод на действующих очистных сооружениях для расчета нагрузки на эти сооружения, определения наиболее оптимальных рабочих условий и наиболее эффективных способов удаления загрязняющих примесей.

Можно подготовить сводку предварительных данных, чтобы показать разбивку по имеющим место загрязняющим примесям и потокам, составляющим суммарные объемы сбрасываемых сточных вод предприятия; при этом особое внимание нужно уделить отдельным потокам от различных технологических процессов и производственных цехов.

Таблица 40.4 Профиль необработанных сточных вод отдельных отраслей промышленности

	Отрасль промышленности*									
	Загрязняющие примеси	Алюминиевая строительная	Химическая	Пищевая	Горнодобы- вающая	Целлюлозно -бумажная	Нефтяная	Стале- литейная	Текстильная	С
Взвешенные твердые вещества	M	C	M	M	M	M	C	M	C	
Минерализация	C	C	M	V	M	C	C	C	C	
Диапазон pH	C	M	M	V	M	M	C	C	C	
Масло и смазка	C	M	M	V	I	M	M	M	C	
Осаждающиеся твердые вещества	M	C	M	M	M	M	C	M	C	
Биохимическая потребность в кислороде (BOD)	V	M	M	M	C	M	M	V	M	
Химическая потребность в кислороде (COD)	V	M	M	M	I	M	M	V	M	
Теплота	C	I	C	C	V	C	C	M	M	
Цвет	V	I	C	C	I	C	I	I	C	
Запах	I	C	C	I	M	V	V	M	I	
Тяжелые металлы	I	V	V	I	V	I	C	V	I	
Цианиды	I	I	I	I	I	I	C	V	I	
Тиоцианаты	I	I	M	I	I	I	C	V	I	
Хроматы	C	C	I	I	I	I	C	V	V	
Фосфаты	I	C	I	V	V	V	V	V	V	
Фториды	C	I	V	I	I	I	C	V	I	
Аммиак	C	I	V	V	V	V	V	V	V	
Органика (сумм.)	I	M	M	V	I	V	C	V	I	
Фенолы	I	I	M	I	I	V	M	V	M	
Пестициды, биоциды	I	I	I	I	I	V	C	V	I	
Поверхностно-активные вещества	V	M	I	C	V	V	C	I	C	

\* М - основной фактор; С - усугубляет проблему; I - незначительная концентрация; V - концентрация колеблется в этой отрасли промышленности; может усугублять проблему.

**ВЫРАВНИВАНИЕ**

На практике при планировании программ обработки сточных вод, прежде всего, предусматривают отстойник большой вместимости для выравнивания концентраций примесей в потоках сточных вод, а в некоторых случаях и температуры. Совершенно очевидно, что никакое предприятие, особенно, то, в котором применяется биологический процесс, не может успешно справиться ни с ливневыми стоками, как показано на рис. 40.2, ни с колебанием концентраций, как показано на рис. 40.3.

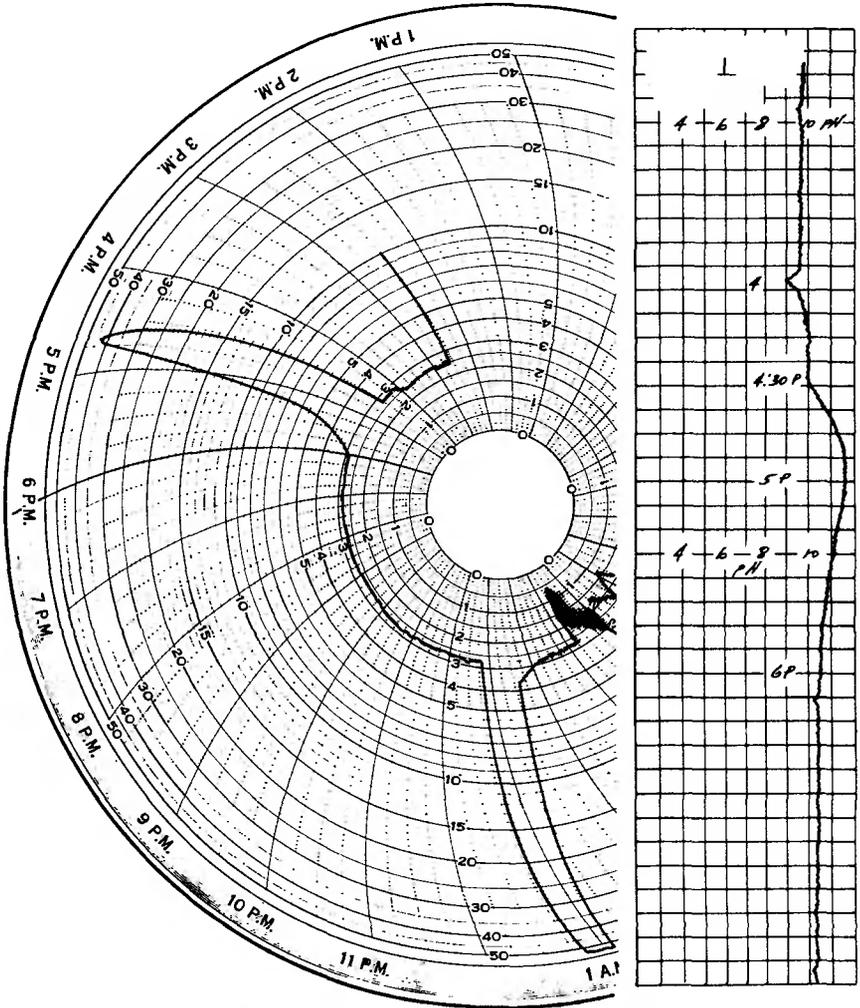


Рис. 40.3 Регистрация удельной электропроводности и рН стоков завода. Показаны стоки, сбрасываемые примерно в 1:00 и от 16:00 до 17:00 в течение нескольких дней. По территории завода проходит старый городской коллектор, и в ходе исследования было выявлено, что с соседнего завода в него проникает отработанная щелочь.

После того, как были предприняты все меры предосторожности для сведения к минимуму возможных колебаний в объемах и концентрации, потребуются новые данные для определения тех изменений, которые все еще имеют место. В таких случаях необходимо предусмотреть отстойник для приема и смешения различных стоков с тем, чтобы получить поток с такой силой и скоростью, который мог бы быть обработан оборудованием для очистки сточных вод, расположенным вниз по потоку.

Для определения объема отстойника необходимо знать максимальную стойкость технологического оборудования к изменениям скорости потока и концентрации примесей. Оборудование для разделения твердых/жидкой сред особенно чувствительно к частым изменениям скорости потока и температуры, в то время как оборудование для сбраживания часто разрушаются вследствие изменений в концентрации примесей и температуре. Иногда максимальная скорость потока может иметь место при одновременной максимальной концентрации примесей; следовательно, необходимо иметь достаточно информации, чтобы установить вероятность такого совпадения. Затем эти данные должны быть подготовлены в виде диаграмм; все значения по отдельным зонам суммированы с тем, чтобы получить минимальные, средние и максимальные показатели нагрузки за определенный период времени и рассчитать время хранения таких сточных вод в отстойнике.

В некоторых случаях процесс выравнивания притока, для которого характерны сильные изменения, может способствовать сведению к минимуму размера отстойника для выравнивания основного потока. В случае больших объемов ливневых стоков и стоков, одновременно сбрасываемых в аварийной ситуации, рекомендуются отстойники с отводами. Однако, в любом случае, отстойники для выравнивания, несмотря на различия в их конструкциях, должны представлять собой достаточное простое применяемое на практике сооружение для предварительной очистки стоков, которое может использоваться для реализации любой промышленной программы очистки сточных вод.

### **УМЕНЬШЕНИЕ ОБЪЕМОВ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ВОДЫ ДЛЯ СВЕДЕНИЯ К МИНИМУМУ НАГРУЗКИ НА ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ**

В тот момент, когда выясняется, что требуется обработка воды в значительных объемах, начинается рассмотрение способов сокращения объемов воды, используемой для заводских нужд. В первую очередь всегда рассматривают возможность сокращения объемов технологической воды, поскольку технологическая вода часто используется в объемах, превышающих потребности оборудования. Во вторую очередь рассматриваются воды, определяемые как слабо загрязненные, но приемлемые для повторного использования в технологическом процессе, не требующем высокого качества воды; такие воды подлежат выделению из общего объема стоков завода. В последнюю очередь рассматривают возможность замены рециркуляционных прямоточных систем непосредственного водяного охлаждения с промежуточным холодоносителем на систему оборотной охлаждающей воды. В сталелитейной и нефтяной отраслях промышленности такой подход может привести к экономии до 90 % воды. На рис. 40.4 показана общая схема использования воды, которая является типовой для многих промышленных предприятий. Главные источники воды представляют собой ливневые стоки плюс обычный источник водоснабжения (который может быть поверхностным или скважиной). Пути сокращения расхода воды, указанные на рис. 40.4, включают: (1) выявление ненужных или неэкономичных потоков, (2) выделение воды и ее направление к вторичным потребителям, и (3) рецикл воды в пределах системы. На рис. 40.5 показано сокращение объемов воды за счет перехода от прямоточной системы водяного охлаждения на систему испарительного охлаждения.

# ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

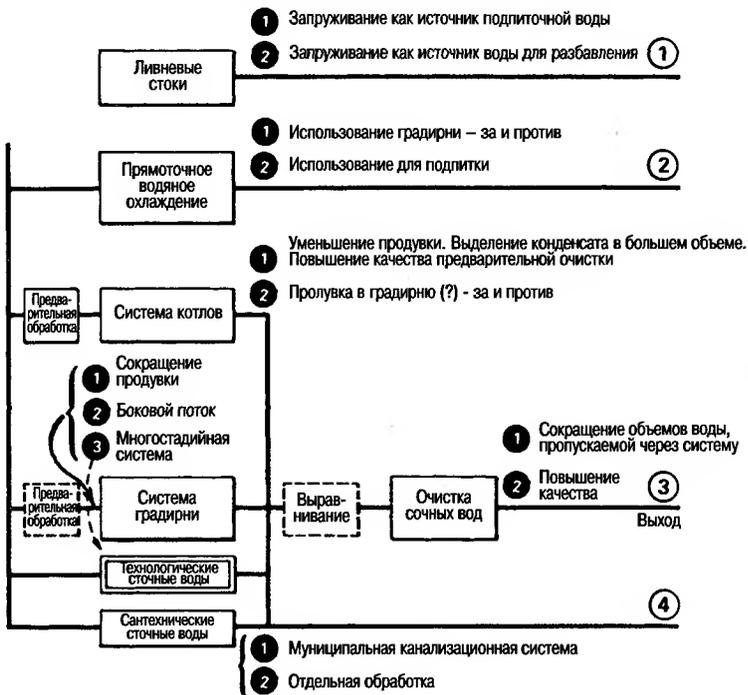


Рис. 40.4 Способы сокращения объемов воды:

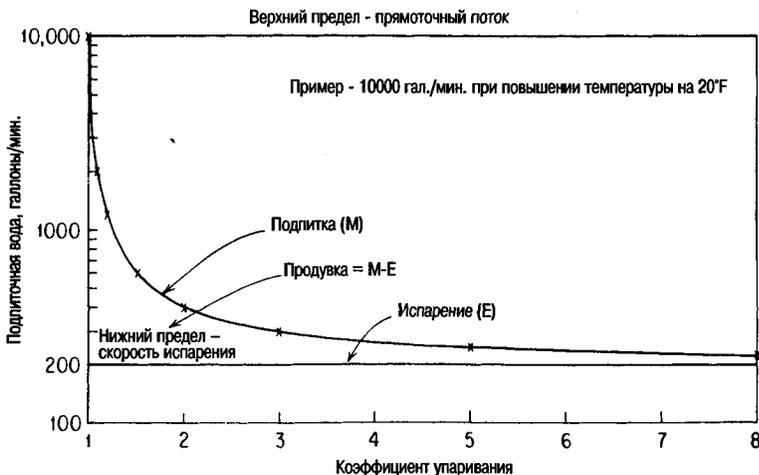


Рис. 40.5 Уменьшение расхода подпиточной воды за счет повышения концентрации солей в системе испарительного охлаждения:

В гальванических и прокатном цехах потребность в промывной воде можно уменьшить более, чем на 75%, просто предусмотрев дополнительные баки для промывной воды с противотоком (рис. 40.6 и 40.7). Если предусмотреть предварительную очистку воды или очистку бокового потока для удаления нежелательных загрязняющих примесей из оборотных систем водяного охлаждения, то можно продлить использование охлаждающей воды и уменьшить продувку из системы.

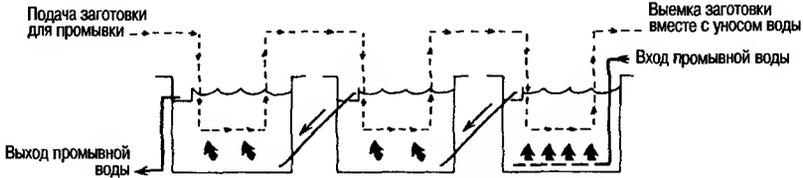


Рис. 40.6 Экономия воды в прокатном цехе за счет противоточной промывки:

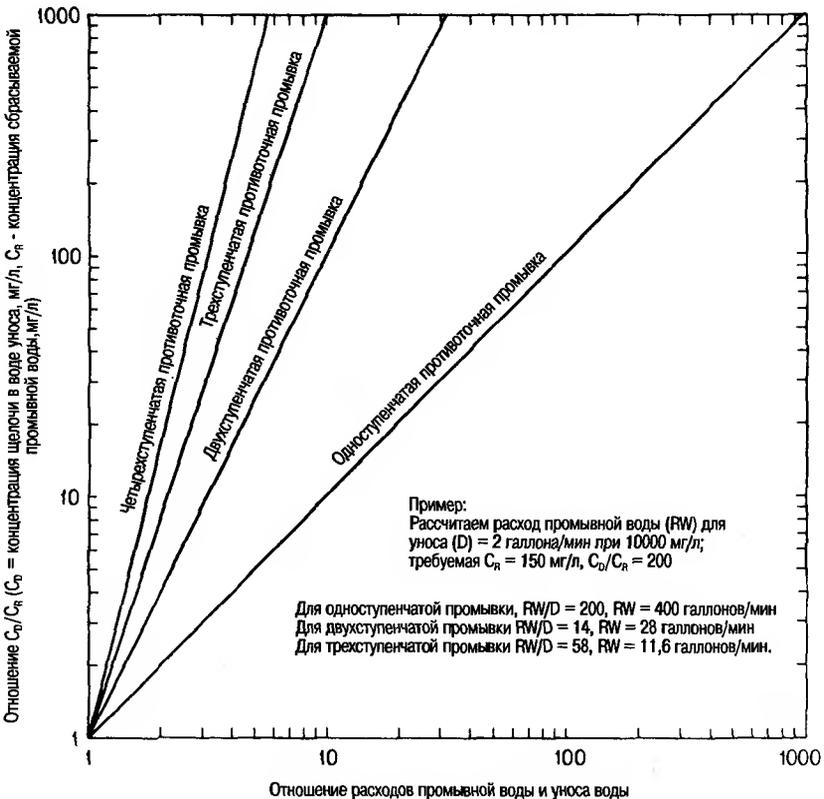


Рис. 40.7 Отношение расходов промывочной воды и уноса воды:

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Если внимательно изучить результаты анализов, то можно заметить, что большая часть загрязняющих примесей, присутствующих в стоках со всего завода, поступает от какого-либо одного технологического процесса или производственной операции. Необходимо гарантировать индивидуальную очистку этого источника загрязнения на заводских очистных сооружениях. В гальванических цехах такая индивидуальная очистка обычно требуется потому, что при обработке стоков, содержащих такие загрязняющие вещества, как цианид или шестивалентный хром, происходят химические реакции, несовместимые друг с другом. Неправильно организованное техобслуживание также может способствовать загрязнению стоков, и, наоборот, продуманные программы техобслуживания, предусматривающие сбор разливов и утечек, могут уменьшить концентрацию загрязняющих примесей в стоках предприятия. На рис. 40.8 показана схема сбора концентрированных сточных вод для их выделения и утилизации или отдельной обработки.

По возможности сантехнические сточные воды должны быть собраны и направлены на муниципальные очистные сооружения. В качестве альтернативного варианта можно было бы предусмотреть септик "септитенк" и для сбора сантехнических сточных вод и их последующего сброса на дренажные площадки, если, конечно объем таких сточных вод небольшой и если позволяют грунтовые условия. Содержимое септика "септитенка") а также может хлорироваться и затем смешиваться с технологическими сточными водами предприятия.

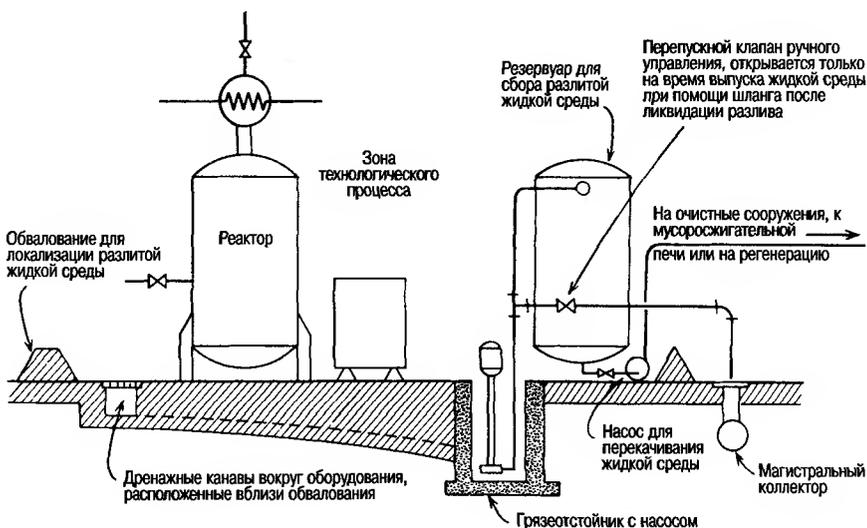


Рис. 40.8 Сооружение обвалования для локализации сточных вод с высокой концентрацией примесей для их отдельной обработки:

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Некоторые промышленные стоки содержат коллоидные твердые вещества или нефтяные эмульсии, которые трудно удалить из стоков и они могут остаться в сточных водах после их очистки на очистных сооружениях. Для дестабилизации этих суспензий требуются коагулянты, позволяющие частицам всплыть на

поверхность или осесть на дно. Обычная проблема, характерная для любых очистных сооружений, это - замедление потока сточных вод, вызванное плохим распределением приточной и сбрасываемой воды, наклонной перегородкой (затвором) сливного отверстия, или другими особенностями конструкции. Эта проблема может быть решена за счет установки дефлекторов или реконструкции системы распределительных трубопроводов и коллектора, с тем чтобы обеспечить эффективное использование всех очистных сооружений. (См. Главы 8 и 9.)

В ходе рассмотрения очистных сооружений завода очень важно оценить возможности действующего заводского оборудования по обработке средних объемов сточных вод. Если установлено, что на отстойники приходится очень большая гидравлическая нагрузка, то могут потребоваться такие меры, как сокращение объемов используемой воды, добавление дополнительного оборудования с соответствующей пропускной способностью или выравнивание дополнительных объемов сточных вод.

Биологические очистные сооружения (БОС) очень чувствительны к состоянию сточных вод. Неэффективное удаление загрязняющих примесей может быть вызвано одним или несколькими факторами, например, непостоянными скоростями потока, слишком высокой или низкой концентрацией органики, низким содержанием растворенного кислорода, неадекватным перемешиванием, недостаточным содержанием таких питательных веществ, как азот или фосфор, присутствием токсических веществ; сильными изменениями в составе сточных вод, pH или температуры, а также ростом нежелательных нитридных бактерий или грибов. Неэффективность обработки стоков может также быть связана с неправильной конструкцией, например, недостаточной аэрацией, недостаточным временем выдержки или неадекватным оборудованием для разделения твердой/жидкой фазы. Работа БОС может быть оптимизирована в результате тщательного анализа всех переменных и определения надлежащих средств управления. (См. Главу 23. "Биологический процесс сбраживания".)

Хотя биологические очистные сооружения могут способствовать эффективному снижению содержания органики, рост микробиологии, имеющий место на очистных сооружениях другого типа, может значительно снизить эффективность всего процесса очистки. Рост микробиологии может способствовать появлению нефлокулирующих твердых веществ или газов с сильным запахом, которые препятствуют эффективному выпадению осадка и являются причинами загрязнения или закупорки оборудования. Рост микробиологии можно держать под контролем посредством предотвращения их скопления на застойных участках, а также устранения или контроля за источником их питания и применения биоцидов.

В результате посещения завода и анализа характеристик сточных вод часто удается уменьшить как объем используемой воды, так и концентрацию загрязняющих примесей, содержание которых требует доочистки. Если на заводе действуют системы очистки сточных вод, то такие внутренние меры, как снижение концентрации загрязняющих примесей, разделение или изучение возможности повторного использования воды в производстве, могут способствовать значительному повышению качества сточных вод и их соответствию качеству воды в водотоке. Такие меры могут быть реализованы за счет сокращения объемов используемой воды и, соответственно, увеличения времени ее нахождения в системе.

Текущий контроль или замена химических веществ непосредственно в источнике образования загрязняющей примеси, могут привести к тому, что потребность в очистке стоков от какого-то конкретного загрязняющего вещества, упадет, как, например, в случае с активированным углем для удаления органики с огнеупорных материалов. Выделение или внутривзаводская обработка в целях снижения концентрации определенных загрязняющих примесей, могут предотвратить тот отрицательный эффект, который может иметь место в результа-

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

те смешения сточных вод от различных технологических процессов, например, смешения одного потока, содержащего металлы, с другим потоком, содержащим цианиды, или потерей плотности твердого вещества при смешении потока с высокой мутностью с потоком, содержащим масла.

### **УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Один из вариантов ликвидации или сокращения отходов технологического процесса предполагает усовершенствование процесса или устранение тех его этапов, на которых они образуются. Например, процесс удаления кожуры - один из источников значительных отходов на большинстве предприятий плодо- и овоще-перерабатывающей промышленности. Исследовательские работы были направлены на модификацию процесса снятия кожуры, с тем, чтобы ее удаление не требовало таких больших объемов воды. Один из разработанных способов предполагает процесс "сухой" очистки картофеля с использованием каустической соды. При обычном способе очистки картофеля с помощью пара или горячего щелока, суммарное БПК сточных вод на 80% определяется содержанием картофельной кожуры. В соответствии с новым способом сухой очистки с применением каустической соды картофельная кожура и каустик собирают вместе в виде твердого остатка, предотвращая тем самым их попадание в сточные воды завода.

На химическом заводе, дополнительные стадии разделения для повышения выхода продукта из испарителей, промывного оборудования, фильтров или кристаллизаторов, могут способствовать снижению потерь продукта из-за его сброса в канализационную систему. Часто такие дополнительные стадии не являются экономически обоснованными в пересчете на себестоимость производства продукта, однако, эти затраты позже окупятся за счет снижения издержек на доочистку сточных вод предприятия.

По возможности, внутризаводские очистные сооружения или меры по усовершенствованию способов очистки сточных вод, должны быть продуманы прежде, чем будет запланировано сооружение дополнительных очистных сооружений. После завершения этой программы все стоки завода должны быть рассмотрены еще раз и охарактеризованы с точки зрения скорости потока и концентрации примесей, чтобы определить степень необходимых изменений, а также те загрязняющие примеси, концентрацию которых еще необходимо сократить. Поскольку сточные воды, скорее всего, будут содержать целый набор загрязняющих примесей в различных концентрациях, только одного процесса обработки обычно недостаточно для эффективного снижения концентрации примеси до требуемых ПДК с тем, чтобы получить разрешение на сброс этих сточных вод в приемный водоток. Если на заводе ранее не было никаких действующих очистных сооружений, то может потребоваться система, как минимум, двухстадийной очистки сточных вод.

Цель первой стадии (так называемой, начальной) или промежуточной стадии процесса обработки заключается в удалении или уменьшении концентрации загрязняющих примесей, которые могли бы отрицательно повлиять на работу или вызвать перегрузку последующего узла обработки (вторичная стадия или доочистка сточных вод).

После окончательного определения характеристик сточных вод, а также требований, предъявляемых к их качеству, можно начинать выбор программы обработки. Прежде всего необходимо определить последовательность стадий обработки, которые необходимы для получения сточных вод требуемого качества. Проектировщик должен подготовить предварительную схему потоков с указанием каждого последующего этапа обработки. Возможно, на основе используемой технологии можно предложить несколько альтернативных способов обработки стоков для их сопоставления.

Решающим фактором при выборе окончательной программы обработки стоков или фактором, значительно облегчающим такой выбор, служат результаты предварительной оценки возможных схем обработки стоков в отношении расчетных издержек, ограничений, характерных для системы, сложности средств управления, потребности в площади и в рабочей силе и, а также в отношении гибкости таких схем и их пригодности для использования в будущем.

## **НЕОБХОДИМОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

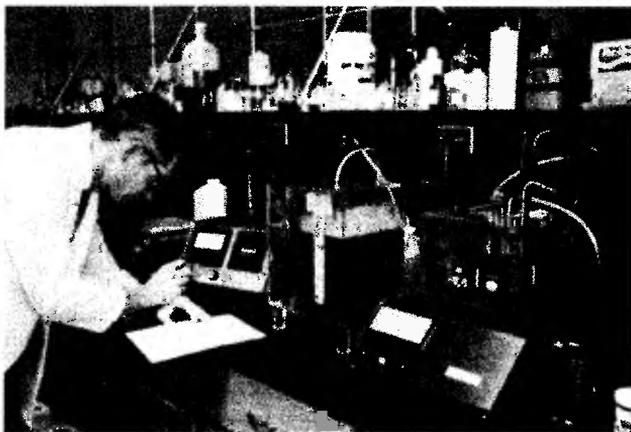
---

Для сбора требуемой для проектировщика информации необходимо проведение исследований на экспериментальных [пилотных] установках, где можно смоделировать процесс обработки сточных вод. Это может быть стендовое испытание или моделирование оборудования в масштабах опытной установки. Стендовые испытания проводить намного легче и быстрее: они обычно проводятся для выявления и определения требований, предъявляемых к химической обработке, и эффективности программы удаления загрязняющих примесей. Для получения точных результатов необходим представительный образец. Для гарантии надежности и возможности получения точных результатов стендовые испытания обычно проводятся с использованием смесей или проб, взятых в различных местах отбора проб. (См. Главу 7, "Отбор проб").

Исследования на опытной установке следует проводить в тех случаях, когда имеют место сильные колебания в объемах стоков, которые должны учитываться при проведении технологического процесса. Исследования, проводимые на опытной установке, должны включать оценку скорости непрерывных потоков сточных вод, предпочтительно с учетом всех потоков, составляющих фактические стоки завода. Исследование следует проводить в течение достаточного продолжительного периода времени, чтобы проверить все основные переменные, зафиксированные на заводе, и получить достаточную информацию для расчета пропускной способности очистных сооружений. Для проведения некоторых исследований на опытной установке, например, при анализе работы биологических очистных сооружений, для гарантии надежности и устойчивых условий работы требуется период акклиматизации. (Рис. 40.9).

В ходе таких исследований определяют количество твердых отходов, полученных в результате предложенной обработки. Во многих отраслях промышленности, где практикуют обработку отходов, начиная от простых операций типа переработки пищевых продуктов, до сложных процессов нефтехимического завода, обработка твердых отходов и их утилизация может представлять огромную проблему, как с технической, так и с экономической точек зрения. В некоторых случаях программа химической обработки сточных вод может быть изменена с тем, чтобы свести к минимуму образование твердого осадка. Например, для сведения к минимуму образования шлама, вместо неорганических коагулянтов следует использовать органические полиэлектролиты. Источники появления твердого осадка в избыточном количестве должны быть зафиксированы и взяты под контроль. Уменьшение потерь химических веществ в ходе технологических процессов также может привести к значительному сокращению образующегося шлама. Это особенно актуально при обработке сточных вод, содержащих металлы, где для нейтрализации и осаждения часто используют известь.

Если твердое вещество трудно выделить в отстойнике для сточных вод, то, более, чем вероятно, что такое вещество трудно поддается обезвоживанию. Такой шлам часто требует химической обработки и специальной переработки, например, пропуска через верхний фильтрующий слой подкладки фильтра под вакуумом или фильтрации под давлением. Химические вещества, используемые



**Рис. 40.9** Биологические стендовые исследования требуют особого внимания при наблюдении и при регистрации данных наблюдений как в течение, так и после периода акклиматизации.

для обработки неорганического осадка, а также материал верхнего фильтрующего слоя фильтра способствуют повышению эксплуатационных издержек не только с точки зрения необходимости их закупки, но также и с точки зрения необходимости их вторичной переработки, поскольку их использование также приводит к увеличению объемов твердого осадка и, следовательно, издержек на его утилизацию и транспортировку. В настоящее время возрастает интерес к процессам стабилизации твердого осадка, или его преобразованию в известковое вещество, напоминающее цемент, стойкое к выщелачиванию неорганических токсических компонентов.

В тех случаях, когда речь идет о внутризаводской обработке или доочистке сточных вод, необходимо уделить должное внимание вопросу окончательной утилизации загрязняющих веществ, выделенных из сточных вод. Летучие загрязняющие примеси могут вызывать загрязнение воздушной среды, а отстой могут содержать вещества, неприемлемые для вывоза на свалку из-за возможного загрязнения ими грунта или поверхностных вод.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАВОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД**

Часто возникает вопрос, могут ли сточные воды завода рассматриваться в качестве источника технической воды. Если да, то, как правило, не без дополнительной обработки. Такие воды могут быть полезными просто потому, что это - вода и она может быть полезной, скажем, для ирригации. Такая вода может использоваться на заводе исключительно для целей промывки, если существует возможность проложить отдельный трубопровод для ее подвода. Однако, на большинстве заводов, вода содержит загрязняющие примеси в больших концентрациях вследствие ее испарения в котлах или испарительных градирнях, и эти концентрации могут еще более повыситься вследствие притока вод с высоким содержанием солей, например, с установок регенерации путем ионного обмена или с отпарных колонн воды с высоким содержанием серы. Концентрация загрязняющих примесей в таких сточных водах, вероятно всего, превышает пределы, которые могут выдержать система охлаждения или система паровых котлов. В таких случаях для улучшения качества сточных вод за счет снижения

таких критических показателей, как жесткость, щелочность воды, содержание растворенных твердых веществ или кремнезема, потребуется дополнительная обработка (рис. 40.10).

Прежде, чем принять решение об использовании сточных вод завода в качестве источника воды необходимо тщательно проанализировать расположение потребителей такой воды по отношению к очистным сооружениям, стоимость отдельного трубопровода для подачи воды, а также баланс между дальнейшей доочисткой таких сточных вод и более полной очисткой сырой воды, поступающей из источника. Большинство исследований показало, что для оптимизации суммарного водяного баланса улучшенная обработка воды, подаваемой к котлам или в систему водяного охлаждения, представляет собой более предпочтительный метод по сравнению с рециклом сточных вод, выходящих с очистного сооружения. Часто сточные воды содержат органическое вещество, которое затрудняет реализацию предложенной программы химической обработки и контроля.

Мы уже говорили о том, что работа испарительной системы осложняется из-за высокой концентрации солей в воде и, следовательно, добавление сточных вод с большим содержанием солей, превышающих ПДК, установленные для испарительной системы, не является эффективным способом, поскольку, фактически, повышается потребность в подпиточной воде с низким содержанием солей.

Из-за повышения концентрации солей при использовании воды, которая еще более повышается в повторных циклах, а также вследствие различных законодательных и технических ограничений, становится очевидным, что главная задача при использовании оборотной воды заключается не в сведении к минимуму объемов ее потребления, а в нахождении наиболее оптимальных способов ее использования. Однако эти цели совпадают, когда воды недостаточно, или где нулевые стоки являются реальностью. В засушливых западных и юго-западных регионах США, нулевые стоки могут быть основополагающим требованием Управления по охране окружающей среды (EPA) на выдачу разрешения на строительство завода. Некоторые коммунальные предприятия, распо-

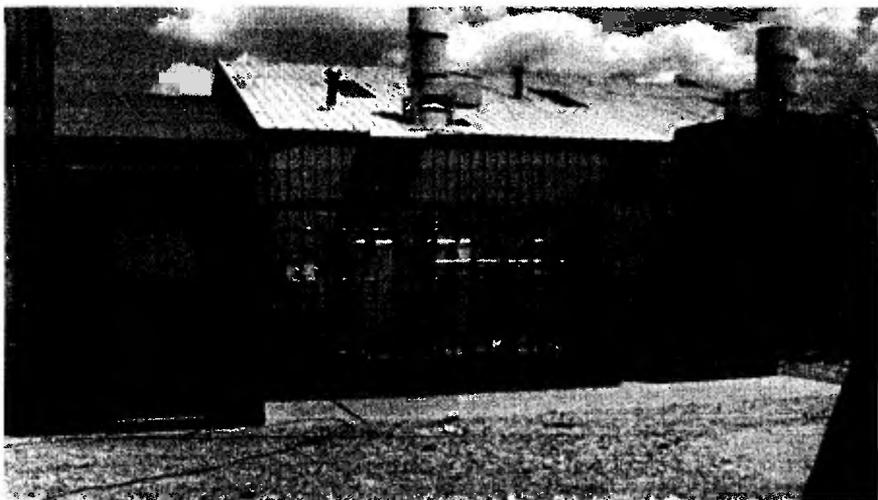


Рис. 40.10 Система обработки сточных вод электродиализом для их выпаривания и окончательной утилизации (с любезного разрешения HPD, Inc., Naperville, Ill.).

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

женные в засушливых регионах, предусматривают испарители, специально разработанные для обработки всех сточных вод предприятия (воды, частично отводимые из градирен, отработанные регенерирующие агенты, воды после промывки и т.д.). Из этих испарителей выходит дистиллят, используемый для рецикла, плюс выпавшие в осадок соли, представляющие собой отработанный твердый осадок. Такое оборудование стоит слишком дорого и его применение может быть обосновано только из-за требований Национальной системы ликвидации выбросов загрязняющих веществ, сводимых к нулевым стокам. В некоторых областях используют специальные испарительные пруды, в которых вода испаряется под действием солнца и, таким образом, предприятие достигает нулевых стоков за счет особенностей района вместо затрат энергии. Там, где это разрешено, конкуренцию испарению может составить просачивание таких стоков в грунт.

### **КОНТРОЛЬ ЗА РЕАЛИЗАЦИЕЙ ПРОГРАММЫ**

---

Для гарантии постоянного соответствия требованиям, предъявляемым к сточным водам, необходим не только хороший проект, но и правильно организованная эксплуатация предприятия. При химической обработке сточных вод нехватка или, наоборот, избыток добавляемого химического вещества приводят к низкой эффективности программы обработки и низкому качеству сточных вод. Необходимо держать под постоянным контролем периодичность ввода химических веществ для обработки сточных вод; это достигается путем проведения лабораторных анализов. При добавлении химикатов также очень важно выбрать правильное место ввода и обеспечивать их непрерывную подачу.

Большинство регулирующих органов власти требуют проведения постоянных запланированных анализов сточных вод предприятий на предмет их соответствия предъявляемым требованиям. В целях выявления наиболее критических характеристик необходимы также анализы сточных вод предприятия до их обработки для того, чтобы иметь возможность скорректировать работу отдельных технологических блоков. Периодичность проведения таких анализов зависит от частоты изменения концентрации загрязняющих примесей в сточных водах.

Чтобы держать качество сбрасываемых сточных вод под постоянным контролем, необходимо на каждом предприятии подготовить диаграммы по потокам сточных вод, которые бы отражали показатель БПК, скорость потока и наличие взвешенных твердых веществ в сточных водах каждого цеха, где ведутся производственные операции (как это делается на муниципальных очистных сооружениях для показа нагрузки на эти сооружения); эти диаграммы позволят персоналу, осуществляющему контроль, быть в курсе всего того, что происходит на подконтрольных им цехах.

Во многих случаях желательно предусмотреть приборы для текущего контроля на потоке (мониторы) для получения постоянной информации о качестве сточных вод и о необходимости скорректировать подачу химических веществ или работу оборудования в целях создания наиболее оптимальных условий работы предприятия. Эти приборы извещают оператора в тех случаях, когда параметры сточных вод выходят за установленные для этих приборов контрольные пределы. Приборы для осуществления мониторинга должны поддерживаться в чистом состоянии, пройти калибровку в соответствии с требованиями компании-поставщика и проверку через определенные промежутки времени, устанавливаемые на основе опыта эксплуатационного персонала.

В дополнение к контрольным анализам, которые обычно проводятся в целях контроля качества сточных вод, регулирующие органы власти могут потребовать проведения биологического текущего контроля сточных вод, сбрасываемых в водоприемники или другие водные бассейны, в которых имеется

флора и фауна, или которые находятся в зонах отдыха. Одним из видов текущего контроля могут быть измерения уровня токсичности. Эти измерения проводятся путем подвергания местной разновидности рыб воздействию определенного [контролируемого] уровня концентрации загрязняющих примесей в сточных водах, и их лучше всего проводить в приемном водотоке, расположенном ниже стоков завода. Иногда полезно вести учет различных водных организмов, обитающих выше и ниже места сброса сточных вода завода. Изменение видов и популяций каждого из таких водных организмов дает полезную информацию о том, какое влияние оказывают на них сточные воды, сбрасываемые заводом.

Промышленные стоки могут отвечать требованиям, предъявляемым к их качеству, и все же содержать примеси, вредные для флоры и фауны приемного водотока. Другой вид мониторинга, связанного с биологической активностью стоков, сбрасываемых в поверхностные воды, предполагает измерение растворенного кислорода, содержащегося в поверхностных водах ниже стоков завода. Температура, а также остаточная органика и растворенные твердые вещества могут привести к уменьшению содержащегося в воде кислорода, так необходимого для живых организмов. (См. Главу 5.)

### **НУЛЕВЫЕ СТОКИ - ВОЗМОЖНОСТИ И РЕАЛЬНОСТЬ**

После того, как проектировщики промышленных предприятий и систем коммунального водоснабжения предприняли ряд попыток свести к минимуму издержки, связанные с ликвидацией производственных сточных вод, большинство из них пришли к выводу о необходимости замены прямоточной системы охлаждения на систему испарительного охлаждения. Существенный результат такого подхода заключался в том, что стоки производства сбрасывались в окружающую среду в виде пара, а не в виде жидкой среды. В качестве примера можно взять типовой завод, на котором используется система прямоточного водяного охлаждения с расходом воды 50000 галлонов/мин при повышении температуры на 20°F (тепловая нагрузка 8,3 млн. БТЕ/мин.). Если заменить эту систему на систему оборотного испарительного водяного охлаждения, то при повышении температуры на 20°F расход воды будет прежним - 50000 галлонов/мин, но вода будет испаряться в объеме 8300 фунтов/мин или 1000 галлонов/мин, в результате чего потребуются приблизительно 1200 галлонов/мин подпиточной воды. При таком расходе завод вернет в окружающую среду только 200 галлонов/мин (вода, частично отводимая из системы), а 1000 галлонов/мин будут потеряны в атмосфере в виде пара и возвратятся на поверхность земли за много миль от этого завода - возможно в границах совсем другого водораздела или в море. Поэтому, несмотря на тенденцию замены системы прямоточного охлаждения, отказ от нее, возможно, не всегда представляет собой наилучший вариант для окружающей среды, которая в данном конкретном примере потеряла в виде пара 1000 галлонов/мин и вернула 200 галлонов/мин воды, с высокой концентрацией осадка, в виде частичного отвода из системы, взамен 1200 галлонов/мин, отданных ею в виде подпиточной воды.

В Соединенных Штатах существенных сокращений в объемах потребления воды и сброса сточных вод на всех промышленных предприятиях сумели добиться благодаря переходу на многократное использование воды. На каждом таком предприятии была установлена иерархия потребителей воды в зависимости от требуемого качества, так, что сточные воды, сбрасываемые потребителем воды высокого качества, часто являлись пригодными для потребителя воды более низкого качества. Такое "каскадирование" в распределении воды от потребителей воды самого высокого качества до потребителей воды самого низкого качества позволило оптимизировать процесс повторного использования воды и свести к минимуму сбросы в окружающую среду.

## ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Несмотря на проявление сильной заинтересованности в нулевых сбросах сточных вод - и эта практика уже фактически была узаконена в некоторых областях, где, казалось, этого требовала окружающая среда - в большинстве случаев внушительные издержки препятствовали реализации этих мероприятий на практике; то есть, высокие издержки делали нерентабельным все производство. Нулевые сбросы требовали выделения из воды растворенных твердых веществ за счет комбинации таких процессов, как замораживание, испарение и кристаллизация, с предварительным электродиализом или другим подобным мембранным процессом (см. рис. 40.10). В засушливых районах может быть реализовано на практике испарение под действием солнца, однако в большинстве случаев необходимы затраты энергии и в таких случаях затраты на нулевые сбросы становятся неэкономичными. Даже на тех предприятиях, где уже практикуются нулевые сбросы, все еще действуют требования к утилизации твердого остатка, удаленного из сточных вод, который, в большинстве случаев является растворимым и непригодным для хранения за пределами завода, где он может снова раствориться в дождливую погоду.

### **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

---

- Arbuckle, J. G., and Vanderver, T. A., Jr.: "Water Pollution Control," Chapter 3, in *Environmental Law Handbook*, 7th ed., Government Institute, Inc., Rockville, Md., 1983.
- Athavaley, A. S., Funk, R. J., Sweet, R. G., and Coney, W. A.: "Deepwell Injection of Industrial Wastes," *Industrial Wastes*, May/June 1981.
- Kemmer, F. N.: "Optimizing Water Supply, Treatment and Recycle Practices," *Chem. Eng.*, October 6, 1980.
- Lund, Herbert, F. (ed): "*Industrial Pollution Control Handbook*," McGraw-Hill, New York, 1971.
- Rubin, Alan, J.: "*Chemistry of Wastewater Technology*." Ann Arbor Science, Ann Arbor, Mich., 1979.



---

## ГЛАВА 41

---

# МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

---

В аппаратах мокрой очистки газов (скрубберах) для удаления твердых, жидких и газообразных загрязняющих веществ из потока газа используют жидкие среды. Эти жидкие среды способствуют фазному разделению посредством растворения, улавливания или вступления в химическую реакцию с примесями.

Скрубберы повсеместно используются для контроля за выбросами, загрязняющими окружающую среду. Существует столько различных конфигураций скрубберов, используемых для этой цели, что порой возникает сомнение, относятся ли все эти скрубберы к одной и той же категории или нет. Например, в некоторой справочной литературе определение скруббера может ограничиваться конкретной конструкцией, т.е. скрубберами открытого типа и скрубберами с насадками. В этом тексте любое устройство, удовлетворяющее определению, приведенному в первом предложении, именуется скруббером мокрой очистки газов или мокрым пылеуловителем.

Системы скрубберов могут быть предназначены для удаления захваченных газами мелких частиц, например, пыли, летучей золы или окислов металлов, а также для удаления газов типа окислов серы ( $\text{SO}_2$ ) из потока дымового газа в целях выполнения требований стандартов по контролю за выбросами в окружающую среду.

---

### **РАЗЛИЧНЫЕ КОНЦЕПЦИИ СБОРА ЧАСТИЦ**

---

При удалении загрязняющих примесей в виде частиц из газов с использованием скрубберов, основная проблема обычно заключается в удалении мелких частиц, размером менее 10 мкм. Отделение более крупных частиц происходит гораздо легче. Успех конструкции и работы скруббера мокрой очистки газов зависит от знания размеров, состава и происхождения частиц, которые необходимо удалить из потока газа.

На рис. 41.1 приведены оценочные размеры частиц некоторых наиболее часто встречающихся загрязняющих примесей. Аналогично тому, как мелкие частицы, содержащиеся в воде (коллоиды) несут в себе заряд статического электричества, коллоидные частицы, содержащиеся в дымовых газах и пыли, определяемые как аэрозоли, также несут в себе заряд статического электричества. Если же эти частицы не несут никакого заряда, их можно преднамеренно зарядить, чтобы облегчить их удаление в специальных сепараторах, называемых электростатическими осадителями или электрофильтрами.

Среди загрязняющих примесей в виде макрочастиц (термин, используемый для взвешенных твердых веществ), удаляемых в скрубберах мокрой промывки газов, можно выделить дисперсные аэрозоли, образующиеся в ходе таких процессов, как процесс измельчения, распыления жидких и тонкого измельчения твердых веществ, а также от процесса транспортировки взвешенного порошкообразного вещества за счет воздушных потоков или вибрации. Дисперсные аэрозоли обычно включают крупнозернистые вещества, хотя размеры частиц могут изменяться в широких пределах. Дисперсные аэрозоли, включающие разрозненные частицы, незначительные скопления частиц и неупорядоченные формирования из различных частиц, называются пылью.

При конденсации перенасыщенных паров или при вступлении газов в химическую реакцию с образованием нелетучего продукта, образуются, так называемые, аэрозоли процесса конденсации. Эти аэрозоли обычно содержат частицы размером менее 1 мкм. В аэрозолях процесса конденсации твердые частицы часто представляют собой рыхлые скопления большого количества первичных частиц в форме кристаллов или частиц округлой формы. Аэрозоли процесса конденсации, в которых в дисперсной фазе находятся твердые вещества или как твердые, так и жидкие вещества, классифицируются как дымы или пары. Аэрозоли с жидкостной дисперсной фазой именуются туманами. Эта классификация обычно применяется независимо от размеров частиц, и иногда отнесение аэрозолей к той или иной категории достаточно затруднено.

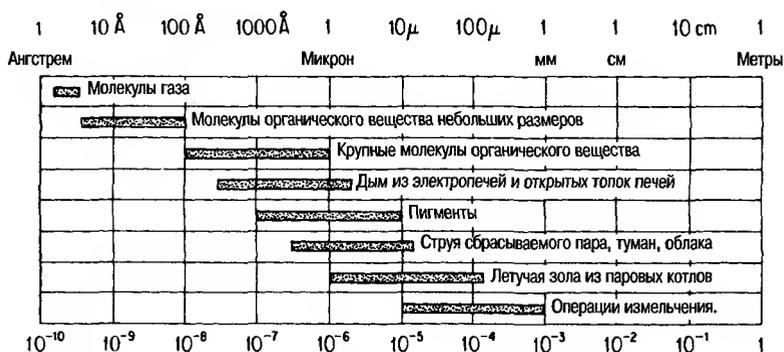


Рис. 41.1 Сравнение размеров частиц, встречающихся в выбросах в атмосферу:

На практике часто возможны комбинации дисперсных аэрозолей и аэрозолей процесса конденсации. Частицы с различными размерами ведут себя по-разному из-за различий в таких физических свойствах, как рассеяние света, скорость испарения и перемещение частиц. Необходимо учитывать эти различия при выборе наиболее оптимального оборудования для удаления частиц из газа. Информация о размерах, объеме и массе частиц может быть получена в ходе микроскопического анализа их размеров и плотности.

## ВЫБРОС АЭРОЗОЛЕЙ ИЛИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Предельно допустимые концентрации (ПДК) по выбросам аэрозолей или твердых частиц (в виде дыма, тумана, пыли) обычно определяются по четырем параметрам:

1. **Скорость выброса:** максимальная масса аэрозолей, которая может, согласно установленным ПДК, быть сброшена в атмосферу, в фунтах в час (кг/ч). Скорость выбросов может быть выражена в других единицах, в зависимости от специфики конкретной отрасли промышленности, например, в фунтах в час на тонну целлюлозы (кг/ч/ккг).
2. **Максимальная концентрация:** Максимальное количество твердого вещества в виде частиц, содержащихся в потоке сбрасываемого газа, например, в г/м<sup>3</sup>, количестве частиц/куб. фут, или в фунтах частиц/1000 фунтов газа.

3. **Максимальная непрозрачность:** Максимальная непрозрачность потока сбрасываемого газа, обычно измеряемая методом наблюдений или сравнений с эмпирическими стандартными числами (числом Рингльмэна).
4. **Скорректированная скорость выброса:** Скорректированная эмиссионная скорость определяется в зависимости от требований стандартов к качеству воздушной среды на дисперсионных свойств частиц при сбросе в атмосферу.

Часто, при сбросах аэрозолей в окружающую среду приходится руководствоваться требованиями сразу нескольких стандартов. При необходимости выполнения требований сразу по четырем пунктам, указанным выше, заводы, как правило, обеспечивают выполнение требований трех первых из них, однако, не проходят по параметру непрозрачности сбросов. Это понятно, поскольку частицы крупных размеров обычно способствуют увеличению массы, в то время как более маленькие частицы, размером от 0,1 до 2,0 мкм – во многом способствуют снижению прозрачности потока сбрасываемых аэрозолей.

В целях выполнения требований стандартов, предъявляемых к выбросам заводов в окружающую среду, часто в воду скруббера вводятся химические добавки для улавливания частиц размером от 0,1 до 2,0 мкм. Такой способ считают экономически эффективным, в частности, если сравнить затраты на химические добавки с затратами на модификацию и добавление новых позиций оборудования.

В скрубберах мокрой очистки газов, речь о которых идет в настоящей главе, для удаления твердых частиц, газов, или одновременно и газов и твердых частиц, из потоков промышленного газа или из газов, сбрасываемых из дымовых труб, используют воду. Часто химия воды, используемой в этих системах скрубберов мокрой очистки газов, чрезвычайно сложная из-за большого разнообразия операций, происходящих одновременно внутри скруббера.

1. **Теплопередача:** газ и вода часто имеют различные температуры, так что в процессе мокрой очистки газа имеет место передача тепла.
2. **Испарение/конденсация:** газ может иметь высокую температуру и быть насыщенным водяным паром. При контакте с более холодной водой газ теряет влагу и происходит одновременное разбавление воды, находящейся в скруббере, образовавшимся конденсатом. Если отходящий газ имеет высокую температуру, однако, не является насыщенным водяным паром (сухой газ), то вода, имеющаяся в скруббере, начинает испаряться, как в градирне, и становится более концентрированной.
3. **Массообмен:** в газе могут содержаться растворимые в воде твердые вещества или газы, которые растворяются в воде скруббера. Вода может также передавать газы в газовый поток. Например, в результате рецикла воды в градирню, вода становится насыщенной  $O_2$  и  $N_2$ , которые впоследствии переходят в газовый поток.
4. **Накипобразование:** Поскольку вода в скруббере нагревается, или увеличивается ее pH, щелочность или содержание в ней сульфатов - сульфитов, то может происходить осаждение  $CaCO_3$ ,  $CaSO_4$  или  $CaSO_3$ , и на скруббере может образовываться накипь.
5. **Коррозия:** обычная и трудно решаемая проблема, присущая большинству скрубберов мокрой очистки газов.
6. **Загрязнение:** Загрязнение может иметь место вследствие коагуляции удаляемых твердых частиц или вследствие микробной деятельности. Во многих потоках промышленного газа содержится органика, которая представляет собой пищу для микробных организмов.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Изготовители скрубберов предлагают удивительно широкий ассортимент своей продукции. Предлагаются скрубберы различных конструкций, размеров и с различными эксплуатационными характеристиками. Одни скрубберы предназначены, прежде всего, для сбора частиц, а другие для массообмена (удаление газа за счет вступления в химическую реакцию). Поскольку для обеих операций, указанных выше, необходим хороший контакт "жидкость-газ", все скрубберы, в определенной степени, имеют возможность собирать частицы и удалять газы. Степень, в которой осуществляется сбор частиц, и показатели по массообмену в скруббере, являются определяющими при выборе того или иного скруббера для решения каждой конкретной проблемы очистки. На рис. 41.2 показан традиционный диапазон очистки с использованием скрубберов мокрой очистки, в сравнении с диапазонами очистки с использованием другого конкурентоспособного оборудования. На рис. 41.3 показана относительная эффективность удаления наиболее часто встречающихся частиц.

Размер частиц – один из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность их удаления; частицы больших размеров удалять намного легче. Труднее всего поддаются удалению частицы размером в 1 мкм ( $10^{-6}$  м).

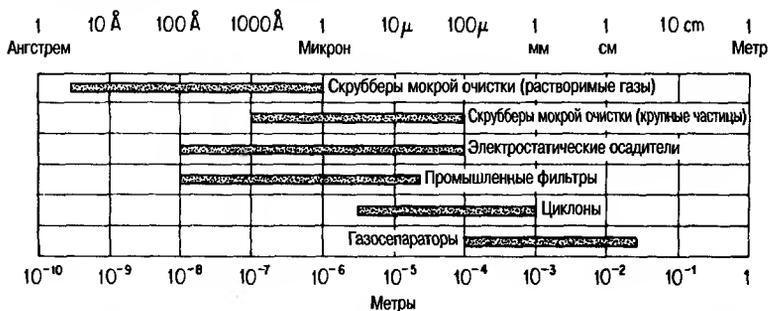


Рис. 41.2 Общая схема применения скрубберов мокрой очистки газов в сравнении с другим конкурентоспособным оборудованием:

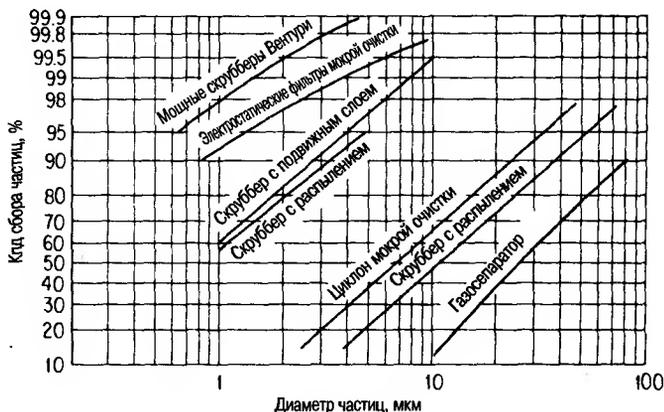


Рис. 41.3 Рабочие характеристики устройств мокрой очистки:

Все скрубберы мокрого сбора частиц используют в работе один и тот же основной принцип аэродинамики. Простая аналогия: если предположить, что капли воды размером с баскетбольный мяч сталкиваются с крупными частицами размером с теннисный мяч, содержащимися в потоке газа, то статистическая вероятность таких столкновений мала. Если же размер капель воды уменьшается и становится соизмеримым с размером частиц, то вероятность такого столкновения повышается. Исследования показали, что поверхностная пленка, окружающая каплю воды, имеет приблизительно толщину, равную  $1/200$  ее диаметра. Теннисный мяч (частица в полете), диаметр которого меньше  $1/200$  диаметра баскетбольного мяча, пролетит, обогнув пленку аэродинамической поверхности баскетбольного мяча, без столкновения с ним (рис. 41.4). Однако, если бы капля воды была бы размером не с баскетбольный, а с бейсбольный мяч, то произошло бы их столкновение. Для увеличения вероятности столкновений частиц дыма размером  $0,5 \text{ мкм}$  с каплями воды, размер капель воды должен быть менее  $100 \text{ мкм}$  ( $200 \times 0,5$ ). Поэтому для эффективной очистки частицы жидкой среды должны иметь сравнительно небольшой размер по отношению к диаметру частиц для гарантии максимального контакта с теми частицами, которые необходимо удалить.

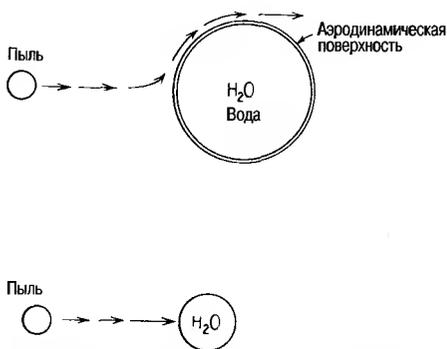


Рис. 41.4 Влияние относительного размера капли воды на размер частицы в процессе сбора крупных частиц.

Вероятность столкновения капли воды и частиц пыли прямо пропорциональна концентрации пыли; столкновение одного теннисного мяча с баскетбольным мячом было бы менее вероятно, чем, если бы на месте одного теннисного мяча их было бы несколько.

Чтобы учесть эти факторы, конструкция скрубберов предполагает возможность регулирования в зависимости от объема газа, который необходимо очистить (измеряется по перепаду давления потока газа), и объема воды, которую нужно распылить (измеряется по гидравлическому давлению в распылительных форсунках).

Высота и диаметр камеры скруббера также рассчитываются в зависимости от известных характеристик газа.

## КЛАССИФИКАЦИЯ СКРУББЕРОВ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Скрубберы мокрой очистки принципиально различаются по методам осуществления контакта рециркулирующей жидкости с потоком газа. Применяются такие методы, как подача жидкости в камеры для сбора в виде ее распыления, ввода жидкости в камеры через перегородки сливных отверстий, барботирование газа через тарелки или слои, содержащие жидкость, и распыление жидкости за счет ее подачи в быстро перемещающийся поток газа.

Один из способов классификации скрубберов мокрой очистки предполагает их отнесение к различным категориям по потреблению энергии. Некоторые скрубберы в процессе работы потребляют много энергии, в то время как другие являются менее энергоемкими. Скрубберы с низким потреблением энергии, как правило, используют для удаления крупных частиц и газообразных загрязняю-

щих веществ. Для повышения КПД очистки в таких скрубберах необходимы высокие соотношения жидкости/газа и продолжительное время их контакта в скруббере. Энергоемкие скрубберы используются для удаления более мелких частиц (менее 1 мкм). В этих скрубберах большое значение имеет высокая скорость газа для возможности распыления жидкости с образованием мелких капель, с тем чтобы обеспечить максимальное число столкновений капель воды с мелкими частицами, которые необходимо удалить.

Другой способ классификации скрубберов мокрой очистки основан на их разграничении по назначению: удаление газообразных загрязняющих веществ или загрязняющих веществ в виде крупных частиц. Скрубберы, предназначенные, прежде всего, для удаления газа, называются скрубберами, в которых происходит массообмен, или газовыми абсорберами; те скрубберы, которые предназначены для удаления макрочастиц, мокрыми пылеуловителями.

## **СКРУББЕРЫ ГАЗОПОГЛОЩЕНИЯ**

---

Газовые абсорберы, относящиеся к первой категории, разработаны в целях обеспечения максимального времени контакта и максимальной площади поверхности между жидкостью, используемой для очистки, и газом. Это обеспечивает максимальные возможности для протекания химических реакций между жидкостью/газом. Газовые абсорберы обычно отличаются незначительной потребностью в энергии. К таким скрубберам, как правило, относятся скрубберы следующих типов: со слоем насадочного материала, с подвижным слоем, скрубберы с отбойниками и скрубберы тарельчатого типа. Хотя мокрые пылеуловители также обеспечивают удаление некоторых газов за счет массообмена, вышеуказанные 4 типа газопоглотителей выполняют это более квалифицированно и более эффективно.

Массообмен (абсорбция газа) требует длительного времени пребывания в системе, поскольку загрязняющие примеси, прежде всего, должны быть поглощены жидкостью, используемой для очистки, а затем вступить в химическую реакцию с образованием продукта, который остается в жидкой фазе.

## **КОЛОННА С НАСАДКОЙ**

---

Колонна с насадкой (слоем насадочного материала) состоит из вертикального аппарата с насадочным материалом: кольца, прокладки или спирали (рис. 41.5). Вода распыляется в верхней части насадочного слоя и затем просачивается через этот насадочный материал. Газ вводят в нижней части аппарата, а удаление загрязняющих примесей происходит по мере перемещения газового потока вверх и его прохождения через промываемый водой насадочный материал.

Поток очищенного газа проходит через брызгоуловитель, расположенный в верхней части аппарата, в котором происходит удаление захваченной газом влаги перед его окончательным сбросом из аппарата. Раствор очищающей жидкости собирают в нижней части аппарата. Определенная часть этой жидкости обычно направляется на повторный цикл на вход аппарата, а оставшаяся ее часть сбрасывается в канализацию.

Хотя потоки могут также быть параллельными или встречными, наиболее широкое применение нашли скрубберы противоточного типа. Слои насадочного материала часто использовались для поглощения газа, поскольку они способствовали уменьшению запаха и сведению объемов загрязняющих газов до незначительных остаточных концентраций. Единственным ограничивающим фактором является экономика. Как только требуется более полное разделение, слои насадочного материала должны иметь большую высоту и эксплуатироваться в условиях более высоких перепадов давления. Газы, поступающие в на-

## МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

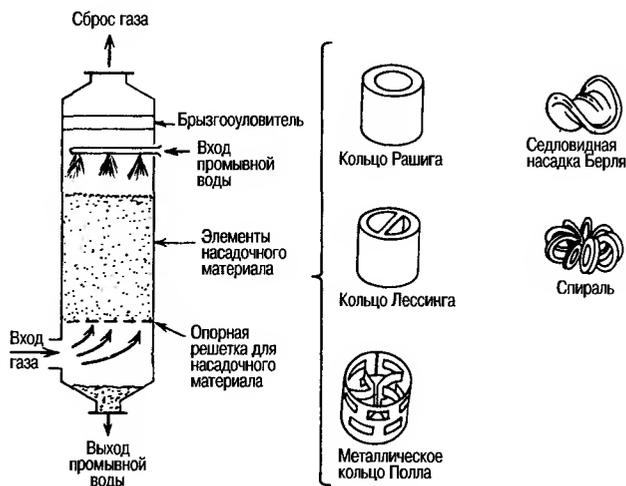


Рис. 41.5 Колонна с насадкой и виды насадочного материала:

садку, не должны содержать частицы твердого вещества в большом количестве, так как это может привести к забивке элементов насадочного материала. Перепад давления обычно составляет 0,5 дюйма  $H_2O$  на фут насадочного материала (4 см  $H_2O/м$ ).

Наиболее распространенные области применения таких скрубберов - заводы по переработке отходов, по производству пищевых продуктов, очистные сооружения, и заводы протравливания металла.

### **СКРУББЕРЫ С ПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ**

Скрубберы мокрой очистки с подвижным слоем очень хорошо подходят для высокой степени теплопередачи и высоких скоростей массообмена (рис. 41.6). Такие скрубберы могут работать без засорений в вязкими жидкими средами и тяжелыми суспензиями. Это достигается за счет использования легковесного сферического насадочного материала, который может свободно перемещаться в пределах между верхней и нижней опорными решетками. Противоточные потоки газа и жидкости приводят к неупорядоченному турбулентному перемещению сфер, в результате чего происходит достаточно равномерное перемешивание жидкости и газа.

В дополнение к такому равномерному перемешиванию газа/жидкой среды, турбулентность потоков способствует непрерывной очистке перемещающихся сфер и сведению к минимуму возможности закупорки или образования каналов в насадочном слое.

Скрубберы с подвижным слоем используются для одновременной абсорбции газа и удаления крупных частиц. Скрубберы этого типа особенно полезны, когда газы содержат вязкие или липкие примеси, которые могут привести к закупорке обычных скрубберов со слоем насадочного материала.

При удалении частиц размером более 1 мкм кпд таких скрубберов достаточной высокой. Кпд как удаления частиц, так и абсорбции газа может быть повышен при последовательном использовании нескольких стадий. Перепад давления обычно составляет от 0,2 до 0,5 дюймов  $H_2O$  на 1 стадию.

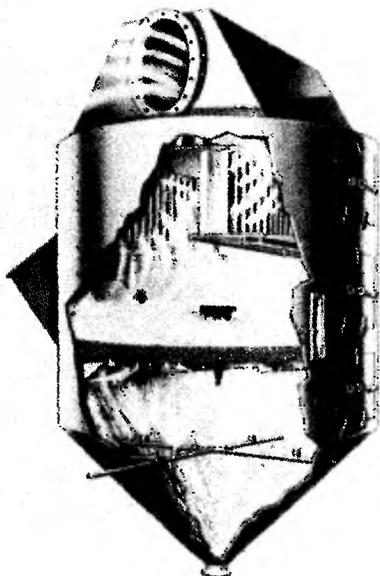


Рис. 41.6 Скруббер с подвижным с насалочным слоем из легковесного сферического материала, который находится в непрерывном движении, предотвращая забивку насадок отложениями (с любезного разрешения *Ducan Company, Inc.*)

## **ТУРБУЛЕНТНЫЙ КОНТАКТНЫЙ АБСОРБЕР ГАЗА (ТСА)**

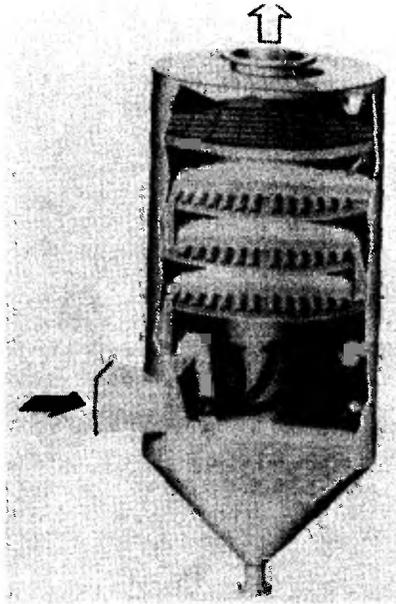
Турбулентный контактный абсорбер газа разрабатывался как усовершенствованный вариант конструкции скруббера с подвижным слоем, единственное отличие заключается в увеличении турбулентности абсорбера вследствие использования меньшего количества сфер на единицу объема. ТСА выводит на более высокий уровень эксплуатационные характеристики скруббера с подвижным слоем и гарантирует высокие скорости перемещения потоков жидкой среды и газа.

### **Скрубберы с тарелками**

Скрубберы с тарелками представляют собой колонну, внутри которой расположены тарелки (рис. 41.7). Жидкость вводится в верхней части колонны, а затем, по пути вниз, протекает по всем тарелкам. Газ, который вводится через отверстия, имеющиеся на каждой тарелке, смешивается с протекающей по ним жидкостью. Такой контакт между газом/жидкостью приводит к абсорбции газа или удалению частиц. Скруббер такого типа назван скруббером с тарелками, поскольку его конструкция предусматривает тарелки; если тарелки имеют сетчатую конструкцию, то такой скруббер называется скруббером с сетчатыми тарелками.

### **Скрубберы с отбойниками**

В некоторых конструкциях для повышения турбулентности и улучшения взаимодействия между газом, частицами и жидкой средой, над каждым сквозным



**Рис. 41.7** Скрубберы с тарелками обеспечивают тесный контакт между газом и жидкостью. В большинстве областей применения плоские тарелки, вследствие турбулентности, почти не имеют отложений. (с любезного разрешения Koch Engineering Company, Inc)

отверстием в сетчатой тарелке устанавливаются отбойники, образуя, таким образом, сетчатую тарелку с отбойниками (рис. 41.8). Такие отбойники располагаются ниже уровня жидкой среды. Перепад давления обычно составляет приблизительно 1-2 дюйма  $H_2O$  для каждой тарелки.

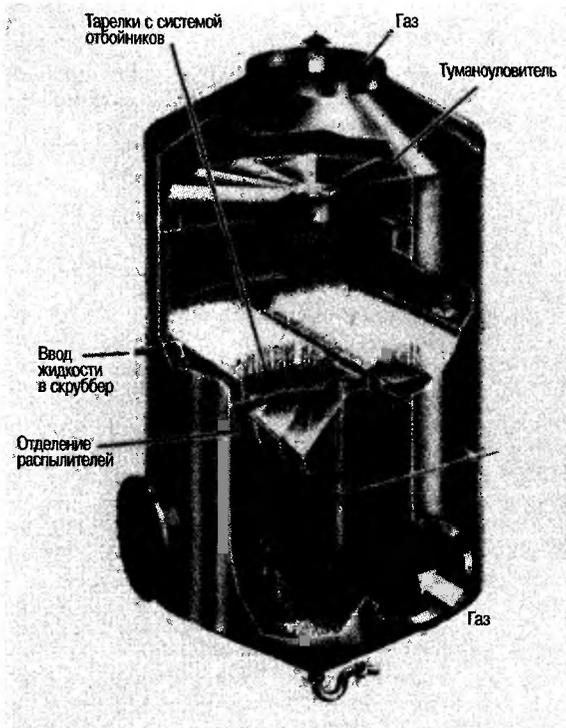
### **МОКРЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ**

Эффективность использования мокрых пылеуловителей определяют четыре основных фактора:

1. Площадь поверхности воды.
2. Отношение "жидкость/газ".
3. Размеры частиц и потребности скруббера в энергии.
4. Сродство частиц и воды (смачиваемость).

Любое механическое устройство или химическое вещество, в результате применения которых из распылительных форсунок распыляется вода с меньшим размером капель, однако с большей площадью поверхности, способствуют увеличению вероятности столкновений между частицами, содержащимися в газовой фазе и воде, в результате чего возможно удаление большего количества крупных частиц.

Второй способ увеличения вероятности столкновений заключается в перекачивании значительно больших объемов воды через скруббер при помощи насо-



**Рис. 41.8** Конструкция скрубберов с отбойниками предусматривает тарелки со сквозными отверстиями для более тесного контакта газа с жидкостью. Для распыления капель воды над сквозными отверстиями располагаются отбойники. (с любезного разрешения W. W. Sly Manufacturing Company.);

сов. Повышение отношения "газ/жидкость" не является эффективным способом увеличения площади поверхности воды. Как правило, более экономичным способом повышения эффективного отношения "газ/жидкость" является формирование капель меньшего размера при помощи механических средств или химических веществ.

Сила, с которой вещество в виде частиц сталкивается с водой, - это третий фактор, определяющий эффективность работы скруббера. Поскольку барьер в виде пленки жидкости отделяет частицы в газовой фазе от воды, такие частицы должны быть наделены достаточной энергией, чтобы проникнуть в каплю воды и быть захваченными ею. Причем, частицам меньших размеров требуется гораздо большая энергия по сравнению с частицами более крупных размеров, так как масса таких частиц меньше и они сталкиваются с барьером с меньшей силой по сравнению с более крупными частицами, двигающимся с той же самой скоростью. Следовательно, процесс удаления мелких частиц требует больше энергии, по сравнению с процессом удаления крупных частиц.

Также больше энергии необходимо затратить на удаление частиц, являющихся гидрофобными (отталкивающимися от воды), по сравнению с удалением частиц аналогичных размеров, которые являются гидрофильными (притягиваются к воде), - а большая часть частиц в газовом потоке являются гидрофобны-

ми. С увеличением механической энергии мокрого пылеуловителя, повышается его способность к удалению более мелких и более гидрофобных частиц.

Другой способ повышения эффективности удаления таких частиц предполагает ввод химического вещества для уменьшения поверхностного натяжения, что способствует повышению смачивающей способности воды.

Для удаления частиц из потоков газа можно использовать как энергоемкие, так и неэнергоемкие скрубберы. Выбор скруббера определяется размером частиц. Для удаления частиц размером более 5 мкм хорошо подходят энергосберегающие скрубберы, например, колонны с распылителем и циклоны мокрой очистки. Если размер частиц меньше 5 мкм, то для более эффективного их удаления лучше использовать энергоемкий скруббер Вентури или эжектор Вентури. Многие системы мокрой очистки, как, например, система очистки газа доменной печи сталелитейного завода, предусматривают сначала использование энергосберегающего скруббера, за которым следует энергоемкий скруббер. В задачу энергосберегающего скруббера входит охлаждение газа (для уменьшения его объема) и удаление из него крупных частиц, снизив, тем самым, нагрузку на энергоемкий скруббер Вентури. Использование такой технологической цепочки способствует также уменьшению пропускной способности и мощности вытяжного вентилятора, так как процесс охлаждения приводит к уменьшению объема газа.

### **Колонны с распылителем**

В колонах с распылителем происходит сбор частиц или газов на каплях жидкости, полученных в результате распыления жидкости через распылительные форсунки. Характеристики таких капель жидкости определяются конструкцией форсунки. Струи распыляемой жидкости направляются в камеру, форма которой разрабатывается таким образом, чтобы обеспечить контакт газа и капель распыляемой жидкости. Колонны с распылителем могут использоваться как для массообмена, так и для сбора частиц. Незначительный перепад давления в таких колоннах, составляющий от 1 до 2 дюймов  $H_2O$ , и высокая скорость воды делает такие колонны наименее дорогостоящими по сравнению с другими скрубберами массообмена. Распылительные камеры, как правило, используются для удаления крупных частиц, охлаждения газа, увлажнения или обезвоживания, а также для удаления газов, отличающихся высокой растворимостью в воде.

### **Циклонные скрубберы мокрой очистки**

Скрубберы, получившие название циклонов мокрой очистки (рис. 41.9), гарантируют эффективное удаление пыли и водяной пыли (аэрозолей). Струя мелко распыленной воды контактирует с потоком газа, который вводится по касательной в нижней части циклона и далее направляется вверх по спирали. Капли распыляемой жидкости улавливаются вращающимся потоком газа и уносятся за счет центробежной силы, имеющей место внутри цилиндра; при этом капли распыленной жидкости сталкиваются, поглощают и собирают частицы пыли или дыма, встречающиеся на их пути. Жидкость, использованная для очистки, вместе с частицами, стекает по стенкам в нижнюю часть аппарата, а очищенный газ покидает аппарат в его верхней части. Более высокий перепад давления в пределах от 6 до 8 дюймов  $H_2O$ , увеличивает затраты энергии по сравнению с колоннами с распылителем.

### **Скрубберы Вентури**

Скрубберы Вентури (Рис. 41.10) лучше всего подходят для удаления частиц размером от 0,05 до 5 мкм, например, частиц, образованных в процессе конденса-

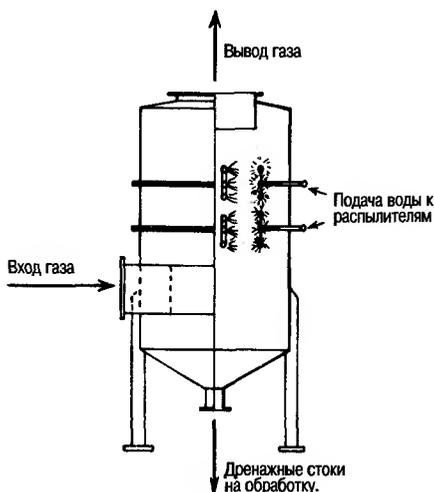


Рис. 41.9 Циклон мокрой очистки газа (с любезного разрешения Seikole Cotrapu. Циклон компаний General Signal);

ции паров жидкого вещества или металла, а также в ходе химической реакции, происходящей с образованием туманов или дыма. К типичным примерам можно отнести пары хлористого аммония, образующиеся в процессе оцинковывания стали, пары пятиоксида фосфора, образующиеся при концентрировании фосфорной кислоты, туманы, образующиеся при получении сухого льда, а также пары оксида цинка, отходящие от отражательных печей.

Удаление этих аэрозолей происходит за счет одновременного пропуска потоков газа и воды через отделение скруббера Вентури, имеющее очень маленькое (критическое) сечение. На этом отрезке скорость потоков увеличивается, в результате чего происходит распыление жидкости на очень мелкие капли. Высокие скорости потока газа, достигающие 200-400 футов/с, повышают относительную скорость между потоками газа и жидкости до такого уровня, при котором происходит оптимальное распыление жидкости и сбор частиц.

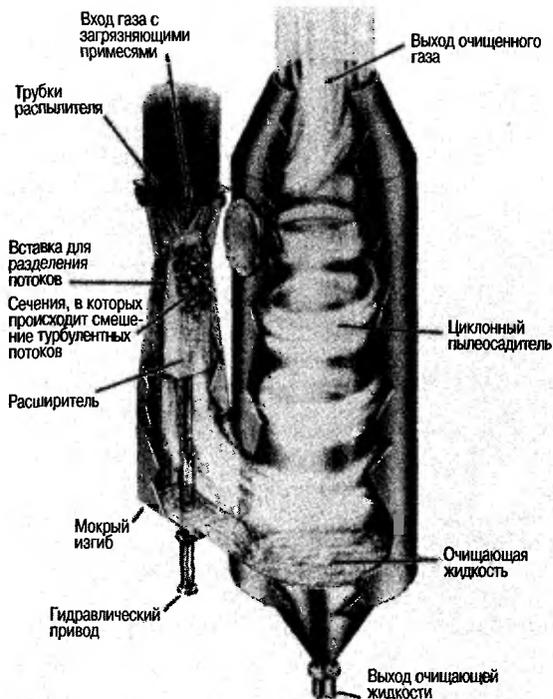
Капли жидкости сталкиваются с частицами и удаляют их из газового потока, и затем капли собираются вместе для отделения от газа. После этого поток очищенного газа направляется в сепаратор для удаления захваченной жидкости.

Скрубберы Вентури требуют высокого перепада давления (от 5 до 100 дюймов  $H_2O$ ). Для гарантии эффективного удаления частиц, перепад давления должен повышаться по мере уменьшения размеров частиц.

Скрубберы Вентури могут также использоваться для удаления растворимых газов. Однако такие области применения ограничены только теми случаями, когда необходимо удалять также и мелкие частицы, так как высокие потребности в энергии скрубберов Вентури, делают их использование только для контроля за выбросами газообразных загрязняющих веществ, экономически нерентабельным.

Разработано несколько модификаций базовой конструкции скруббера Вентури в зависимости от размеров и типа удаляемых частиц. В настоящее время имеются скрубберы Вентури с низкими, средними и высокими потребностями в энергии, которые непосредственно определяются перепадом давления, необходимым для удаления частиц размером менее 1 микрона.

## МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ



**Рис. 41.10** Скрубберы Вентури с переменным критическим сечением, способным выдерживать любые изменения в потоке газа (с любезного разрешения FMC Corporation.):

Многие скрубберы Вентури проектируются с изменяющимся критическим сечением с тем, чтобы выдержать изменения в нагрузке. Также и при постоянной скорости потоков, с уменьшением размера критического сечения увеличивается скорость потоков, в результате чего увеличивается перепад давления и, следовательно, возможно более эффективное удаление частиц размером менее 1 микрона.

Распыление воды, используемой для очистки в скрубберах Вентури, возможно несколькими способами. Наиболее часто применяемый способ распыления - это распыление жидкости через форсунки, расположенные в критическом сечении скруббера Вентури (рис. 41.10). Это обеспечивает эффективное удаление пыли с размерами частиц менее 1 микрона, а также частиц, содержащихся в дымах и туманах, и этот способ подходит для большинства областей применения скрубберов такого типа. В другой также часто встречающейся в промышленности конструкции скруббера Вентури, получившей название скруббера Вентури с затопляемыми стенками, жидкая среда, используемая для очистки, вводится по касательной в верхней части аппарата, как показано на рис. 41.11. Затем спиралеобразный поток жидкой среды спускается вниз по сужающемуся стенкам в виде непрерывной пленки, пока не достигнет критического сечения. На входе в критическое сечение она образует завесу из жидкости в газовом потоке. Прохождение газа через эту завесу приводит к распылению жидкости. Дальнейшие столкновения и агломерация происходит в последующей секции аппарата с расходящимися стенками.

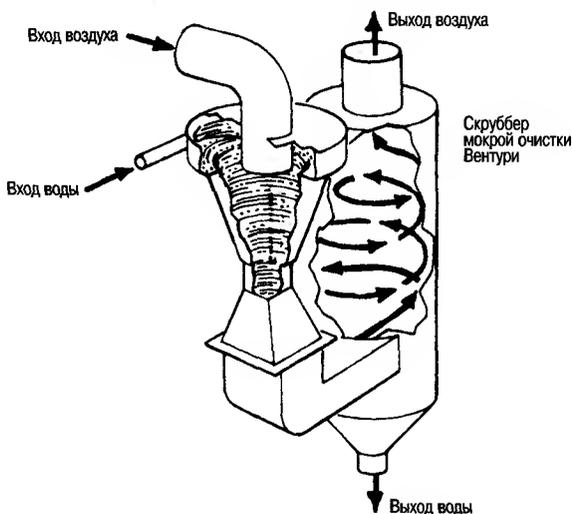


Рис. 41.11 В этой конструкции скруббера Вентури вода распыляется и стекает вниз по спирали в направлении критического сечения скруббера:

Скруббер Вентури такого типа рекомендуется для областей применения, предполагающих возможность наличия "очень тяжелых ситуаций": удаление "липкого" твердого вещества из газов, рециркуляция загрязненной воды, в тех случаях, когда забор свежей воды ограничен и выделение концентрированных веществ в ходе технологических процессов.

Еще одна разновидность скруббера Вентури - это скруббер с затопляемым диском. В этом скруббере жидкость поступает к диску в точке, расположенной чуть выше критического сечения скруббера Вентури. Затем жидкость перемещается к краям диска, где происходит ее распыление при столкновении с потоком газа, подаваемого с высокой скоростью.

На рис. 41.12 показан эжектор Вентури, в котором для распыления под высоким давлением используются форсунки, в результате чего происходит сбор частиц, поглощение газов, а также перемещение потока газа. Этот эжектор получает энергию от жидкости высокого давления, в то время как обычные скрубберы Вентури получают большую часть энергии от газа, подаваемого с высокой скоростью, благодаря работе вытяжного вентилятора. В некоторых случаях вытяжной вентилятор может и не потребоваться в зависимости от конструкции эжектора Вентури.

Существует большое различие в скоростях капель жидкости и газа; это различие оказывает влияние на процесс разделения частиц. Кпд

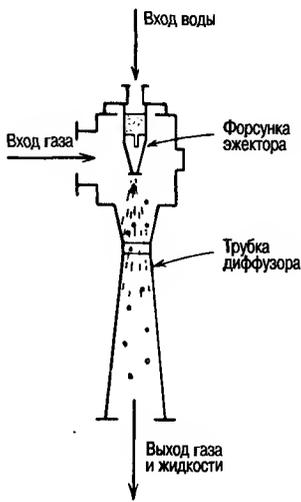


Рис. 41.12 Эжекторный скруббер Вентури использует энергию воды:

сбора частиц, как правило, высокий, если их размеры превышают 1 мкм. Массообмен зависит от спутного потока "газ-жидкость". Затраты энергии относительно высоки из-за использования насосов.

Эжекторы Вентури могут использоваться как самостоятельный аппарат или как первая стадия более сложной системы очистки. В скрубберах этого типа основной механизм сбора - движение по инерции капель жидкости и их столкновение и сцепление с частицами. Сцепление частицы с каплей воды после их столкновения зависит от степени смачиваемости частиц. Поскольку в качестве воды, используемой для очистки, обычно применяется оборотная вода, то форсунки должны быть рассчитаны на то, что в такой воде возможны высокие концентрации твердых примесей.

### **МОКРЫЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ОСАДИТЕЛИ (ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ)**

Для повышения качества очистки могут использоваться мокрые электростатические осадители или фильтры. В системе такого типа вода непрерывно циркулирует по тарелкам и затем сбрасывается в сборник для воды, содержащей золь или в концентратор для очистки и повторного использования.

### **ПРОБЛЕМЫ НА СТОРОНЕ ВОДЫ**

Эксплуатационный режим в скруббере может способствовать тому, что вода станет в высокой степени агрессивной и может способствовать образованию коррозии или накипи, в зависимости от очищаемого газового потока и природы химических веществ, добавляемых в воду. Во многих системах используют суспензии извести/известняка для нейтрализации  $SO_2$ , в результате чего образуются нерастворимые в воде соединения, направляемые на удаление к концентратору. Проблемы, с которыми приходится сталкиваться при эксплуатации мокрых скрубберов, аналогичны проблемам, характерным для открытых систем оборотного водяного охлаждения, однако, вода, используемая в скрубберах, часто содержит соли в больших концентрациях.

Программы химической обработки систем мокрых скрубберов рассчитаны на:

1. Поддержание в чистоте форсунок и поверхностей сбора, предотвращая образование отложений или накипи, способствуя, тем самым, повышению КПД скруббера.
2. Увеличение численности собираемых частиц или, если речь идет об удалении газа, улучшение процесса массообмена.
3. Борьбу с коррозией в скруббере и в системе оборотного водоснабжения.

Можно перечислить целый ряд проблем на стороне воды в скрубберах, начиная от образования накипи и отложений, до проблем коррозии и утилизации отходов. В зависимости от содержания влаги и точки росы потока газа, охлаждение газа может вызвать испарение или конденсацию, в результате чего вода в скруббере становится более концентрированной и требует разбавления.

Если температура потока газа выше точки росы, использование оборотной воды для мокрой очистки приводит к тому, что вода в скруббере начинает испаряться и конденсироваться, что, наряду с самим газом и частицами, удаляемыми из газового потока, также вносит свой вклад в проблему коррозии и накипеобразования. Однако, в некоторых системах газ достаточно насыщен водяными парами, так что может происходить конденсация с последующим разбавлением оборотной воды. В результате можно уменьшить проблемы образования накипи, отложений и коррозии. Однако обычно разбавление практикуется реже, чем концентрирование.

Каждая система очистки должна рассматриваться индивидуально из-за широкого разнообразия используемых конструкционных материалов, включая низкоуглеродистые и нержавеющие стали, медь и сплавы никеля, стекловолокно, поливинилхлорид, керамику, свинец, огнеупорные материалы, а также многие другие материалы. В целях борьбы с коррозией некоторые компании-изготовители предпочитают использовать сплавы и неметаллические материалы для различных моделей скрубберов, однако для таких скрубберов все еще характерны проблемы образования накипи и отложений. Те же самые методы и принципы, которые используются для борьбы с коррозией и отложениями в системах водяного охлаждения, применимы и для скрубберов.

Системы скрубберов, работающие при низких значениях pH, обычно имеют осадок, образованный, главным образом, частицами, удаленными из газа. Для систем, работающих при значениях pH выше 7,0, характерна проблема накипи, образующейся вследствие химических реакций, в которые вступает вода, или проблемы и накипи и наличия взвешенных твердых веществ.

Таблица 41.1 Результаты анализа типичных отложений \*†

	Сахарный завод, скруббер на подаче	Электростанция, скруббер-брызгоулавитель	Технологический скруббер – карбид кальция	Скруббер коксового газа – карбид кальция	Скруббер доменной печи – возврат в печь
Кальций (в виде CaO)	60	49	36.4	33	52
Железо (в виде Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1		2.6	5	9
Карбонат (в виде CO <sub>2</sub> )	2	16		0	21
Сера (в виде SO <sub>3</sub> )	36	32		44	4
Кремний (в виде SiO <sub>2</sub> )	1	2	2	4	6
Алюминий (в виде Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1	1		1	3
Хлор (в виде Cl)	0	0		2	
Натрий (в виде Na <sub>2</sub> O)	0	0		5	
Магний (в виде MgO)	0	0	58.5	5	1
Потери при 800°C	14	16	60	67	23
Углерод	0	0	5	62	5
Углеродороды	0	0	19		

\* Содержание неорганики в обезвоженном образце в пересчете на 100 %

† Все показатели в %.

Однако, даже для систем такого типа с высоким значением pH иногда характерен осадок, образованный, главным образом, частицами, удаленными из газа. Что касается состава такого осадка, то достаточно трудно сделать какие-либо общие выводы, из-за огромного разнообразия конструкций скрубберов, технологических газов и характеристик используемой для очистки воды. Наиболее часто в системах такого типа встречается углекислый кальций, сульфат кальция, известь [Ca(OH)<sub>2</sub>], окись железа, сажа (копоть), масла и жиры, алюмосиликаты (глины) и сульфиды металлов. Отложения, подобно коррозии, могут иметь место фактически в любом месте скруббера - от входа газа до лопастей вентилятора и дымовой трубы. Отложения часто встречаются в критическом сечении скруббера Вентури, на тарелках, в насадках газовых абсорберов, трубопроводах оборотной воды, в насосах, брызгоулавителях, эксгаустерах и в трубопроводах, подающих воду к очистителям.

В табл. 41.1 по результатам анализов представлены основные составляющие отложений, извлеченных из скрубберов различного типа, чтобы продемонстрировать, насколько отложения из скрубберов одной отрасли промышленности отличаются от отложений из скрубберов других отраслей промышленности. Эти результаты свидетельствуют о том, что состав отложений изме-

няется в широких пределах, однако, как можно заметить, наиболее часто встречается кальций.

В целях борьбы с отложениями и образованием накипи достаточно эффективным средством является химическая обработка, которая используется для контроля за образованием большей части отложений. Однако, из-за разнообразия проблем, связанных с наличием отложений в различных скрубберах, такая химическая обработка должна разрабатываться индивидуально для каждого конкретного скруббера.

## **ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД**

Поскольку основная функция скруббера мокрой очистки заключается в удалении загрязняющих примесей из технологических газов и из рабочих газов, образованных продуктами сгорания, то как только скруббер закончил операцию мокрой очистки, необходимо предусмотреть способ удаления тех загрязняющих примесей, которые перешли в воду. Если завод небольшой, то такие сточные воды могут быть направлены непосредственно в коллектор для санитарно-технических сточных вод. Для завода большей мощности могут потребоваться внутризаводская система осветления воды. Такие системы бывают двух типов. Первый тип - это осветлитель на потоке, рассчитанный на полный поток воды, т.е. осветлитель, используемый для очистки всей воды скруббера после того, как она будет пропущена через скруббер один раз. Вода выходит из осветлителя и направляется обратно в скруббер для повторного использования. Установка такого осветлителя намного смягчает проблемы, поскольку концентрация взвешенных твердых веществ обычно поддерживается на достаточно низком уровне. Система такого типа во многом сопоставима с прямоточной системой.

Осветлители, относящиеся ко второму типу, обычно используются для осветления бокового потока воды, частично отводимой из системы, перед ее сбросом. Система такого типа обычно применяется, если проблемы стоят более остро.

Жидкость, используемая для очистки, с высоким показателем БПК, высокой концентрацией тяжелых металлов или токсических веществ, может потребовать дополнительной обработки, например, биологического окисления, до ее сброса.

## **ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

Хотя скруббер мокрой очистки является "сердцем" системы очистки газов, для обеспечения его эффективной работы необходимо также и вспомогательное оборудование. Вспомогательное оборудование может быть отнесено к следующим категориям:

1. Пылеуловители используются для удаления крупных частиц твердых примесей для предотвращения перегрузки скруббера.
2. Охладители газа используются для охлаждения газов с высокой температурой (более 1000°F) и уменьшения испарения в скруббере.
3. Каплеуловители (брызгоулавители) служат для уменьшения содержания капель воды в отработанном газе.
4. Газовые градирни уменьшают шлейф отвода.
5. Градирни, охлаждающие водоемы или водоемы с разбрызгиванием обеспечивают оптимальный рецикл воды для сведения к минимуму потребности в подпиточной воде.

6. Вытяжные вентиляторы перемещают газ от скруббера до выпускного отверстия или до дымовой трубы.
7. Нагнетательные вентиляторы перемещают газ в скруббер через выпускное отверстие или дымовую трубу.
8. Система разогрева газа уменьшает шлейф отвода за счет повышения точки росы газа.
9. Осветлители, концентраторы и отстойные пруды облегчают повторный цикл и восстанавливают твердые примеси для их утилизации или повторного использования.
10. Устройства обезвоживания отстоя переводят восстановленное сухое вещество в твердую фазу.

## РАЗЛИЧНЫЕ ВАРИАНТЫ СИСТЕМ ПРОМЫВКИ ГАЗА

В этом разделе представлены различные варианты систем газовых скрубберов, используемых на электростанциях общего пользования, сталелитейной и целлюлозно-бумажной промышленности, включая основные виды скрубберов и вспомогательных систем для этих областей применения, а также характер проблем, имеющих место на стороне воды.

### Удаление примесей в виде частиц (золы) и SO<sub>2</sub> из дымового газа

Хотя для этой области применения скрубберов на электростанциях общего пользования разработано несколько систем, включающих скрубберы различных типов, для иллюстрации множества аспектов мокрой очистки, о которых говорилось ранее, был выбран процесс с использованием известняка.

На рис. 41.13 показан процесс очистки для удаления SO<sub>2</sub> из дымового газа парового котла. Два модуля скрубберов, каждый из которых включает скруб-

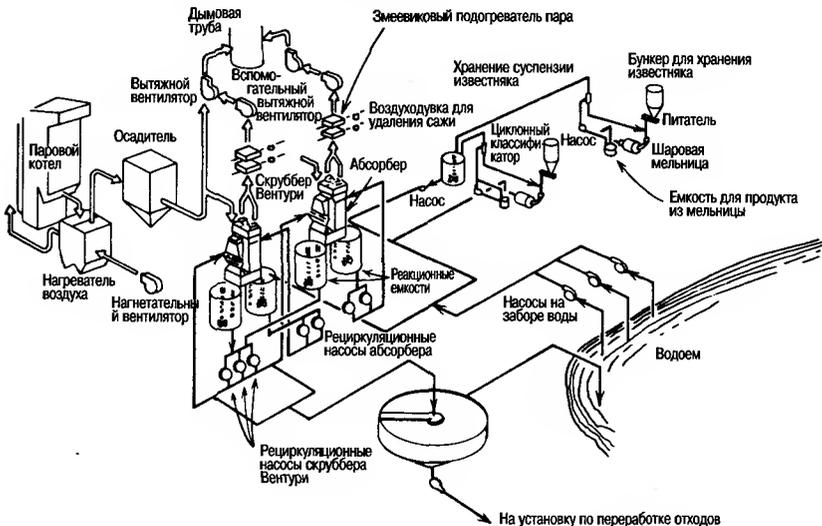


Рис. 41.13 Система очистки дымового газа на электростанции общего пользования (Из Power, сентябрь 1974.)

бер Вентурии/абсорбер, занимающие центральное место в системе, осуществляют очистку всего потока дымового газа. Эта система разрабатывалась в дополнение к уже имеющейся традиционной системе очистки отходящих газов.

Известняк, хранящийся в бункерах, подается через гравиметрический питатель во влажную шаровую мельницу и систему классификатора. Суспензия известняка (с концентрацией твердых примесей 20%) выходит из мельницы и поступает на хранение для дальнейшего направления, при необходимости, к модулям скрубберов.

Каждый модуль скрубберов включает в себя (1) скруббер Вентури с переменным критическим сечением, в котором происходит удаление летучей золы, а также начальная стадия удаления  $SO_2$ , за которым следует (2) тарельчатый абсорбер с противотоком. Вода от процессов распыления, происходящих в скруббере Вентури и абсорбере, направляется в отдельные реакционные емкости, в которых химические реакции идут до конца, после чего суспензия возвращается в скруббер.

Отработанную суспензию из скруббера, главным образом, сульфит кальция ( $CaSO_3$ ), перекачивают насосами к концентратору. Из концентратора осветленную воду сбрасывают в водоем, откуда вновь забирается в реакционные емкости. Слив из нижней части концентратора направляют на установку обработки суспензии, на которой в суспензию добавляют летучую золу и другие сухие добавки, чтобы гелеобразный осадок стал приемлемым для направления в отвал.

После каждого из абсорберов очищенные дымовые газы пропускают через змеевиковый подогреватель с гладкими трубами, а затем направляют к вспомогательному вентилятору. Потоки от обоих вспомогательных вентиляторов направляются на входы вытяжного вентилятора. Электростатический осадитель, расположенный перед скрубберами, служит для удаления большей части летучей золы. В случае отказа в работе системы скрубберов, поток с выхода электростатического осадителя направляется по байпасу непосредственно к дымовой трубе.

Основные функции управления, включая управление скоростью подачи известняка, скоростью распыления воды в скруббере Вентури, перепадами давления в скруббере Вентури, концентрацией твердых примесей в суспензии и работой мельницы, осуществляются автоматически из помещения управления работой парового котла.

Основные проблемы, имеющие место на стороне воды, - это накипь и отложения в скрубберах Вентури, абсорберах, а также в трубопроводах и рециркуляционных насосах скрубберов Вентури и абсорберов.

### **Скрубберы очистки дымового газа сталелитейного завода**

Скрубберы мокрой очистки обычно применяются в сталелитейной промышленности для очистки газов доменной печи и кислородного конвертера (BOF). Схема и описание каждого такого процесса будет представлена ниже, чтобы показать, как основной скруббер и вспомогательное оборудование могут быть объединены в единую систему для обеспечения высокой степени очистки отходящих газов.

Газ доменной печи содержит CO и используется для сжигания в котельных. При этом необходимо, чтобы поток газа был чистым и охлажденным для сокращения объема газа и содержащейся в нем влаги до начала процесса сжигания. Предварительное охлаждение и уменьшение объема газа гарантирует значительную экономию издержек на его передачу по распределительной системе всего завода, имеющей внушительные размеры. Поскольку главная цель очистки газа доменной печи заключается в том, чтобы получить охлажденный, не содержащий пыли газ, который мог бы найти применение в качестве топлива, сжигаемого в котельных, система очистки газа должна соответствовать схеме, показанной на рис. 41.14.

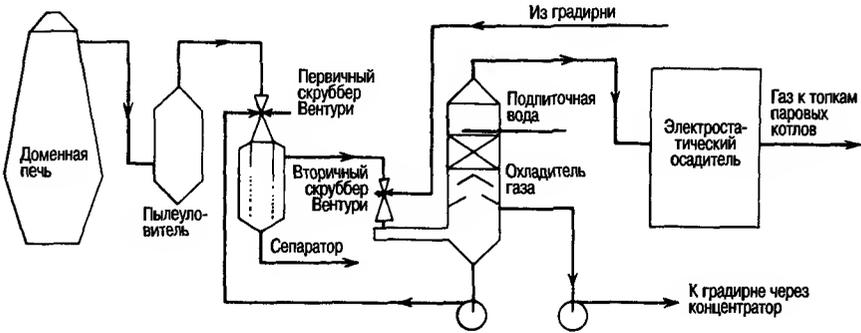


Рис. 41.14 Система очистки газа доменной печи:

Для эффективного удаления смеси крупных и мелких частиц пыли, содержащейся в очень запыленном газе, требуется пылеулавнитель и система очистки газа, включающая несколько скрубберов Вентури. Для эффективного охлаждения необходима градирня для охлаждения потока газа перед его направлением в котельную.

Пылеулавнитель представляет собой обычную камеру, где происходит процесс осаждения и удаления крупных частиц в целях уменьшения нагрузки на скрубберы Вентури. Газ пропускают сначала через первый (первичный) скруббер Вентури (с сепаратором), а затем, через расположенный далее по технологической цепочке, второй (вторичный) скруббер Вентури для более эффективного удаления частиц. После этого газ направляется в систему, состоящую из сепаратора захваченных частиц/охладителя газа. И только после этого очищенный и охлажденный газ направляется к печам. Во избежание проблем в системе распределительных трубопроводов и в печах, особенно в зимний период времени, необходимо предусмотреть адекватное охлаждение газа, чтобы уменьшить содержание в нем влаги.

Оборотная вода после первичного скруббера Вентури со значительной концентрацией частиц твердых примесей, направляется непосредственно в осветлитель, одновременно представляющий собой концентратор. Обратная вода из сепаратора направляется обратно в первичный скруббер Вентури. В осветлитель добавляется подпиточная вода и затем этот смешанный поток направляется во вторичный скруббер Вентури. Следовательно, самая чистая вода контактирует с самым чистым газом, а затем направляется на повторный цикл сначала в первичный скруббер Вентури, а затем в осветлитель. Из осветлителя вода может направляться снова в скруббер или может использоваться для каких-либо других целей, например, для быстрого охлаждения шлака.

Традиционная градирня обычно используется для отвода тепла из воды градирни для охлаждения газа или из воды скруббера. Конструкция градирни позволяет не смешивать потоки охлаждающей воды и воды скруббера Вентури.

Вода скруббера обычно является достаточно жесткой и щелочной из-за наличия известки в шахте доменной печи. Следовательно, в таких системах часто встречается накипь. Отложения окиси железа и несгоревшего углерода также представляют собой проблему во многих системах. С проблемами осаждения наиболее часто сталкиваются в области насадок и критического сечения, где газ содержит самые высокие концентрации частиц, а также в трубопроводах и насосах, идущих к концентратору и отходящих от него. Однако осаждение может происходить в обоих скрубберах Вентури, сепараторах, градирнях, охлаждающих газ, или в трубопроводах и насосах обратной воды скруббера. Еще одной

## МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

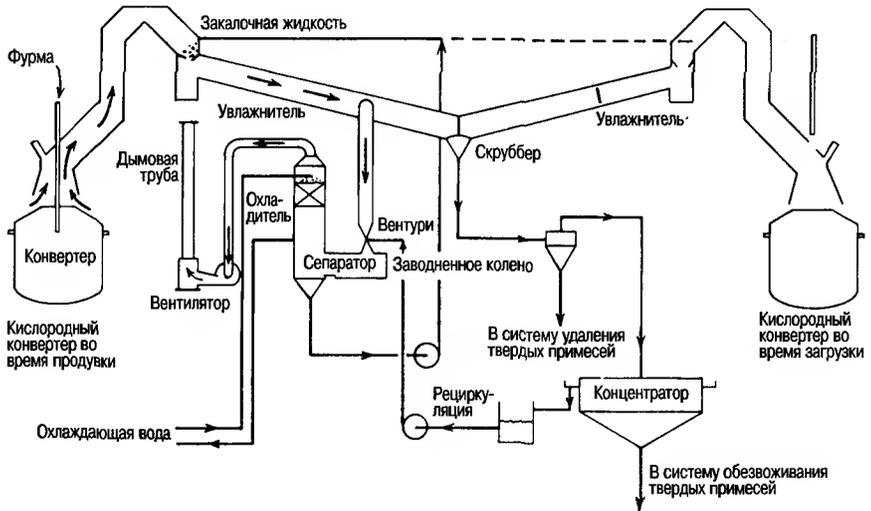


Рис. 41.15 Система очистки газа кислородного конвертера (BOF)

проблемной зоной является осветлитель, поскольку неадекватное разделение жидкости/твердых примесей часто приводит к низкому качеству воды, выходящей из него.

Цель очистки газа кислородного конвертера состоит только в том, чтобы сточные воды конвертера имели приемлемое качество для сброса в окружающую среду, поскольку очищенный газ кислородного конвертера повторно не может быть использован. Поэтому система очистки газа кислородного конвертера с использованием скруббера, показанная на рис. 41.15, несколько отличается от системы, используемой для очистки газа доменной печи, применяется резкое охлаждение, а система, состоящая из первичного и вторичного скруббера Вентури, заменена на один скруббер Вентури.

Задача резкого охлаждения заключается в существенном снижении температуры газа, на 1000-1500 °F (560-840 °C), и уменьшении объема газа, а следовательно, и мощности требуемого вентилятора. Вторая задача заключается в удалении пыли и крупных частиц, размером более 10 мкм. Эти частицы собирают в скруббере, а затем направляют в систему для удаления твердых примесей и в концентратор. Увлажненный и охлажденный газ затем проходит через скруббер Вентури, заводненное колено, сепаратор и охладитель газа, после чего он направляется в дымовую трубу.

Оборотная вода системы очистки кислородного конвертера после осветлителя подается насосами в скруббер Вентури, затем - ее собирают в сепараторе, подают насосами на быстрое охлаждение, собирают в скруббере и далее направляют в систему концентратора для осветления и повторного использования. Затем для удаления сбросного тепла воды для охлаждения газа используют градирню.

Накипь - это, как правило, главная первичная проблема в большинстве систем очистки газов кислородного конвертера с использованием скруббера. Концентрации кальция и уровни щелочности колеблются, но обычно в небольших пределах, как в системе очистки газов доменной печи. Образование накипи более вероятно в системах очистки газов кислородного конвертера, т.к. во

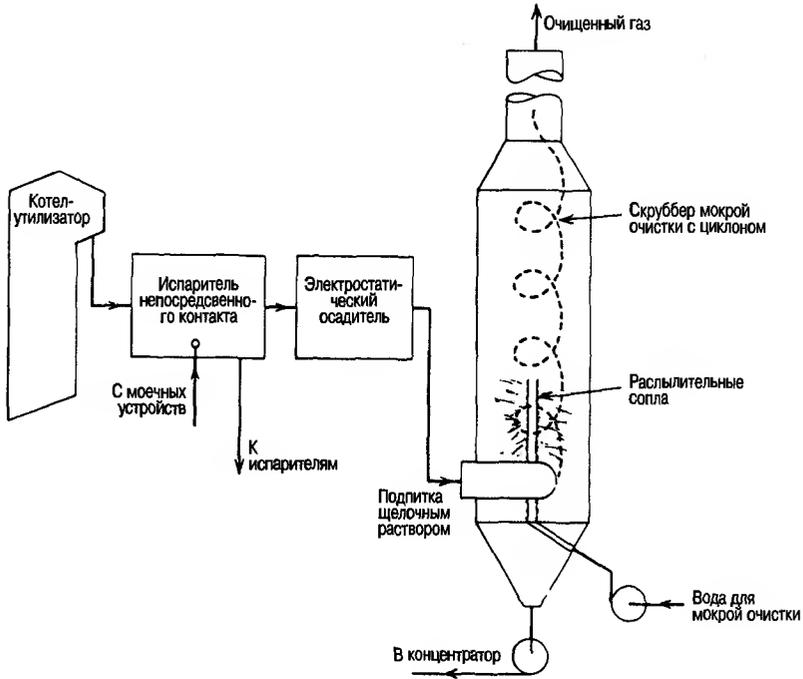


Рис. 41.16 Система очистки дымового газа котла-утилизатора, используемого в целлюлозно-бумажной промышленности для восстановления шелока натровой варки:

время добавления извести в конвертер в период продувки значения pH иногда могут достигать 11,0. В концентрате уровень pH обычно более постоянный, чем в воде скруббера, из-за процесса выравнивания, происходящего в концентрате.

Проблемные места в системе очистки газов с использованием скрубберов, аналогичны тем, что и в системе очистки газов доменной печи.

### Мокрые скрубберы очистки газа целлюлозно-бумажного производства

Наиболее распространенные области применения мокрых скрубберов для очистки газов в целлюлозно-бумажной промышленности - это отходящие газы процессов сжигания угля, древесной коры, дымовые газы котлов-утилизаторов, а также отходящие газы печей для обжига извести. Тип скруббера мокрой очистки, который лучше всего подходит для вышеперечисленных областей применения - это комбинация, включающая скруббер Вентури и циклонный сепаратор или комбинация из электростатического осадителя/мокрого циклона. Скруббер для очистки дымового газа котла-утилизатора предполагает использование циклонного сепаратора в комбинации с электростатическим осадителем (рис. 41.16), в то время как другие процессы предполагают использование скруббера Вентури в комбинации с циклоном.

Скруббер Вентури/циклон или циклонные скрубберы - это системы, для которых характерны обычные проблемы, встречающиеся и в других системах мокрой очистки - осаждение и образование накипи. В скрубберах систем для об-

## МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

жиги извести чаще всего образуется накипь углекислого кальция, поскольку в отходящих газах содержатся частицы  $\text{CaO}$  и  $\text{CaCO}_3$ . Проблемы, имеющие место в концентраторе, используемом в целлюлозно-бумажной промышленности, аналогичны тем проблемам, которые характерны для концентраторов, используемых на электростанциях общего пользования и в сталелитейной отрасли промышленности.



---

## ГЛАВА 42

---

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

---

В Соединенных Штатах Америки пресная вода используется в сельском хозяйстве в большем объеме, чем для всех промышленных нужд, включая ее использование в качестве охлаждающей воды на электростанциях общего пользования. Самое большое количество воды расходуется на ирригацию, что является главной темой настоящей главы. Фермерские хозяйства используют воду для содержания домашнего скота и коммунально-бытового водопотребления, для сельскохозяйственных машин и оборудования, в частности, для охлаждения дизельных двигателей, а также для приготовления используемых в сельском хозяйстве химических растворов, таких, как удобрения и гербициды.

Для сельскохозяйственного водоснабжения используются как поверхностные так и подземные водные источники; наибольший объем воды поступает из поверхностных источников, однако системы водоснабжения в большинстве случаев используют артезианскую воду. Примером использования поверхностных вод является орошение земель западных районов водой реки Колорадо. Полив затоплением с целью выщелачивания почвы и орошения земель в этих районах применяется настолько широко, что это стало причиной изменения солёности воды в реке Колорадо, и Соединенные Штаты в соответствии с обязательствами, принятыми перед соседней страной Мексикой, находящейся ниже по течению, вынуждены принимать меры для опреснения воды в реке.

### ***ПОЛИВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР***

---

Хотя полив проводится и для некоторых сельскохозяйственных культур на территории вдоль восточного морского побережья, однако, основной расход оросительной воды приходится на штаты со сравнительно скудными запасами воды и малым количеством осадков, имеются в виду штаты, находящиеся к западу от реки Миссисипи. Поэтому для полива сельскохозяйственных культур в этих штатах все шире используются регенерированные сточные воды. В течение многих лет сточные воды станции очистки сточных вод в Луббоке, штат Техас, в полном объеме используются для полива хлопка. Однако использование выходящих сточных вод городских водоочистных станций для полива продовольственных сельскохозяйственных культур является более сложной проблемой, которая требует тщательного изучения таких потенциальных вопросов, как содержание тяжелых металлов в сточных водах, присутствие в них патогенных организмов и влияние каждого из этих факторов на сельскохозяйственные культуры.

Оросительная вода из источника должна подаваться насосами и проходить через распределительную систему определенного типа, открытую или закрытую. Многие распределительные системы выполнены в виде открытых каналов и водоводов, что создает такие проблемы, как биологическое обрастание, загрязнение отложениями, просачивание воды через почву (в этом случае имеют место самые большие потери воды на пути к месту ее использования) и потери от испарения.

В разных частях этой главы рассмотрены проблемы, встречающиеся в закрытых распределительных системах; к ним относятся проблемы образования коррозии, накипи и отложений вследствие наличия в воде взвешенных осадков или микробной деятельности. Причиной осаждения в распределительной системе может быть добавление в оросительную воду аммиака в качестве удобрения.

Во многих оросительных системах применяются пластмассовые трубы, так как они имеют небольшой вес и легко монтируются. В таких трубопроводах проблема коррозии отсутствует. После подачи к месту использования вода поступает в оросительную систему, это может быть система подачи самотеком, система орошения дождеванием или система капельного орошения. При применении системы подачи самотеком возможно полное затопление полей водой, как при выращивании риса; или оросительная вода может течь по полю, имеющему уклон. В настоящее время основной объем оросительной воды распределяется при помощи систем подачи самотеком.

Системы орошения дождеванием могут быть надземными; они широко применяются для орошения таких сельскохозяйственных культур, как люцерна. Надземные разбрызгивающие системы предназначены для орошения отдельных полей, имеющих диаметр до 2500 футов (750 м) (Рис. 42.1). В разбрызгивающих системах второго типа применяются разбрызгиватели с низкой тракторной. Такая конструкция может быть использована для полива цитрусовых культур, чтобы обеспечить орошение только почвы, оставляя листву сухой. При орошении дождеванием имеют место значительные потери воды от испарения вследствие большой площади поверхности воды, образующейся при работе разбрызгивателей. Кроме того, при испарении происходит охлаждение, что может вызвать тепловой стресс у растений.

Последняя оросительная система, система капельного орошения, разработана для удовлетворения нужд сельского хозяйства в засушливых районах, где потери воды от испарения недопустимы. Вода в определенном объеме подается к каждому выращиваемому растению с заданной скоростью при помощи устройства, изображенного на Рис. 42.2. Из-за малой объемной скорости потока воды для полива каждого растения в системе такого типа, во избежание забивки выпускных отверстий, регулирующих расход воды в каждом месте, следует



Рис. 42.1 Надземные оросительные системы распределяют воду на большой площади, занятой под сельскохозяйственные культуры, медленно перемещаясь по полю, чтобы обеспечить оптимальный расход воды (Публикация с разрешения Valmont Industries, Inc.).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

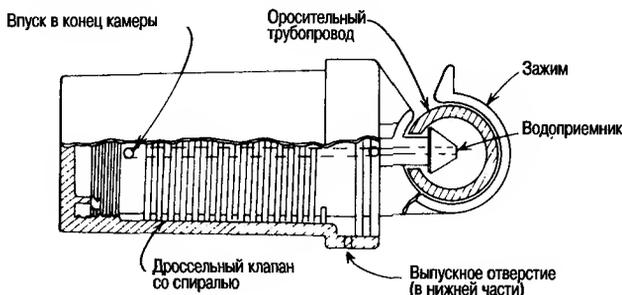


Рис. 42.2 При капельном орошении такой эмиттер снижает давление воды за счет сопротивления трению благодаря дроссельному клапану с длинной спиралью, так что выпускное отверстие может иметь максимально возможный диаметр во избежание забивки.

полностью исключить образование отложений ила и бактериальной пленки в результате микробной деятельности.

### **ХАРАКТЕР ПОЧВЫ**

Почва представляет собой удивительную смесь неорганических веществ, образующихся в результате разрушения горных пород и глины под влиянием атмосферных воздействий, и органических веществ, образующихся при гниении растительности. Физические напряжения вследствие суточных температурных изменений или сезонного замораживания и оттаивания, а также в результате ветровой и ливневой эрозии приводят к расслаиванию горных пород, подвергающихся атмосферным воздействиям, и разрушению их на мелкие частицы. Процесс разрушения происходит также в результате растворяющего действия воды, за счет частичного растворения оксидов, карбонатов и полевого шпата с выделением частиц менее растворимых веществ. Результатом этих атмосферных воздействий является образование ила и песка, которые смываются в долины и осаждаются там вместе с другими почвообразующими веществами.

Примерно таким же образом происходит разрушение глин; кроме того, глины передают смеси образующих почву веществ способность к набуханию и свою ионообменную емкость. И, наконец, в результате бактериального действия происходит разрушение высокомолекулярных органических веществ, таких, как гуминовые кислоты, фульвокислоты и полисахариды, наряду с низкомолекулярными веществами, например, белком. Также как и органические компоненты в окрашенной воде, эти коллоидные вещества несут заряд, который нейтрализуется, когда их центры ионного обмена поглощают кальций, магний и железо, в результате чего происходит флокуляция и осаждение органических веществ вместе с песком и илом.

В такой почвенной смеси глина обычно присутствует в виде мелких частиц размером менее 5 мкм. Размер частиц ила обычно находится в пределах 5 - 50 мкм, а частиц песка - в пределах от 50 мкм до 2 мм.

В Таблице 42.1 указаны свойства некоторых почв, а на Рис. 42.3 представлена схема различных уже описанных типов почв. Примерно 50% объема почвы занимают пустоты, содержащие воздух и влагу; это важное обстоятельство помогает изучить среду обитания почвенных бактерий и капиллярные эффекты, которые не только сохраняют влажность почвы, но иногда способствуют поступлению воды в корневую систему от горизонта грунтовых вод, находящегося намного ниже уровня растений.

Таблица 42.1 Анализ почвенных образцов

Свойства	Образец		
	А	В	С
Органические вещества, %	0,9	1,0	1,4
Са, ppm*	1600	700	2000
Mg, ppm	150	160	440
K, ppm	210	71	397
P, ppm	103	9	135
pH	7,9	6,2	7,4
H <sup>+</sup> , мэкв/100 г	0,0	0,7	0,0
Катионообменная емкость, мэкв/100 г	9,8	5,7	14,7
Песок, %	68,0	74,0	58,8
Ил, %	27,2	17,2	33,2
Глина, %	4,8	8,8	8,8

\* мг/кг почвы

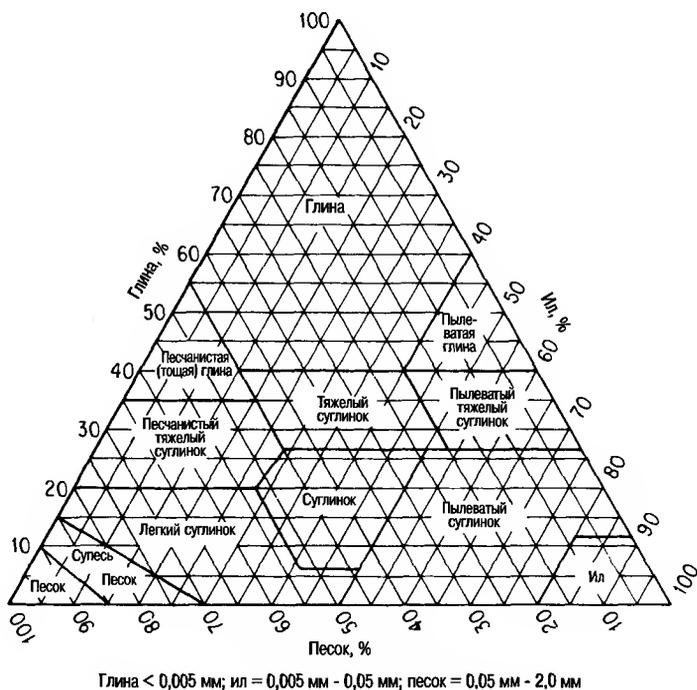


Рис. 42.3 Классификация почв, разработанная Министерством сельского хозяйства США.

Влажность почвы измеряют тензиометром. Если объем пустот насыщен водой, то прибор показывает ноль; когда проводится осушение почвы и воздух занимает все большую часть пустот, создается всасывающий эффект, и по показаниям на круговой шкале прибора (вакуумметра) можно видеть, что уровень вакуума повышается. Градуировка шкалы выполнена в единицах барометричес-

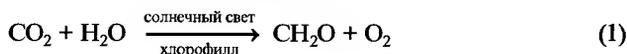
## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

кого давления (бары) и показание 70 сантибар обычно следует рассматривать как предупреждение о том, что почва становится слишком сухой и требует полива. Тензиометр можно использовать для автоматического управления оросительной установкой; например, при давлении 30 - 40 сантибар он может включать подачу воды, а при давлении 10 - 20 сантибар прекращать подачу.

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ**

Хотя классификация многих свойств почвы проводится субъективно, например, такого свойства, как рыхлость, многие другие свойства можно определить довольно точно путем измерений. К ним относятся водопроницаемость (коэффициент фильтрации) грунта, способность к набуханию, ионообменная емкость и удельная проводимость водной вытяжки. Важным свойством является также величина pH водной вытяжки, так как она влияет на выбор и дозировку химикатов, применяемых для улучшения свойств почвы (оструктурирования почвы).

Растения, растущие на любых почвах, где достаточно влаги и солнечного света, поглощают углекислый газ и воду с образованием углеводов и кислорода, см. уравнение реакции, приведенное ниже:



Из этой реакции следует, что 60 % углеводной массы образуется с участием воды. Другими словами, вес воды, необходимой для образования углеводов, в одном бушеле пшеницы весом около 60 фунтов (27 кг) составляет около 40 фунтов (18 кг). Количество воды, получаемое растением, гораздо больше того количества воды, которое расходуется на образование углеводов, так как происходит транспирация (у растений этот процесс аналогичен процессу потоотделения) из листьев и сток избыточной воды мимо корневой системы. В процессе транспирации из растения испаряется чистая вода и остается более концентрированная жидкость. Другими словами, растение действует как испаритель, при испарении происходит охлаждение поверхности, так же как охлаждение кожи при потовыделении у животных.

Еще одним важным обстоятельством, связанным с реакцией фотосинтеза, является то, что для нее в качестве катализатора требуется хлорофилл. Для образования молекулы хлорофилла необходим магний, который должен поступать в жидкую среду растения через корневую систему в процессе селекции. Для клеточного синтеза растению необходимы также многие другие вещества, в том числе, фосфор, калий, азот и сера. В зависимости от вида растения ему для питания требуются некоторые элементы в небольших количествах, они тоже должны поступать из воды и почвы. Растения, для полива которых используются сточные воды, выходящие с городской станции очистки воды, поглощают тяжелые металлы, в том числе, возможно, такие токсичные вещества, как свинец и цинк. Однако эти вещества могут накапливаться в стеблях, листьях или корнях, не проникая в плоды. Для того чтобы определить, какое действие оказывают тяжелые металлы, присутствующие в городских сточных водах, на конкретные продовольственные сельскохозяйственные культуры, необходимо изучать отдельно каждую из этих проблем.

Растворение необходимых питательных веществ, для того чтобы они могли поступать через наружную поверхность корней в жидкую среду растения, частично обеспечивают почвенные бактерии. В большинстве случаев они являются аэробными организмами, поэтому создание анаэробных условий вследствие недостаточного осушения или полива сточными водами с высоким содержи-

ем пищевых продуктов органического происхождения может быть пагубным для растений.

### **ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ**

Так как листва растений испаряет воду, жидкая среда растений становится более концентрированной по сравнению с грунтовыми водами. Под действием осмотического давления вода из почвы проходит через поверхность корней, в результате чего в корневой системе концентрация воды повышается. Если соленость воды в корневой системе становится слишком высокой, осмотический поток может изменить свое направление на обратное, в этом случае возможно обезвоживание растения, так как вода из него уходит в почву. В Табл. 42.2 на основе измерения проводимости массы, приготовленной из почвенного образца, показана относительная солеустойчивость различных групп сельскохозяйственных культур.

**Таблица 42.2** Солеустойчивость некоторых сельскохозяйственных культур

Высокая солеустойчивость (10000-16000 мкСм)	Средняя солеустойчивость (4000 - 10000 мкСм)	Низкая солеустойчивость (< 4000 мкСм)
Ячмень	Люцерна	Сельдерей
Сахарная свекла	Рожь	Зеленые бобы
Хлопок	Пшеница	Бобы русские
Шпинат	Овес	Цитрусовые
	Рис	
	Кукуруза	
	Картофель	
	Морковь	

*Источник:* Water Quality Criteria, 1972, публикация Управления охраны окружающей среды США R.3-73-033. Исходные данные Salinity Laboratory Staff, USDA 1953.

Помимо концентрирования вследствие транспирации воды из растений и осмотического потока имеются и другие факторы, влияющие на состав воды, удерживаемой корневой системой. Важным фактором, влияющим на состав воды, является капиллярное действие почвы, в результате которого вода поднимается к поверхности и испаряется в атмосферу. По мере концентрирования воды вследствие транспирации, осмоса или испарения в атмосферу изменяются два важных показателя качества воды: индекс стабильности (либо индекс Ланжелье, либо индекс Стиффа-Девиса) и относительный показатель адсорбции натрия (SAR). Этот показатель рассчитывают по формуле:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

где ионные концентрации выражены в эквивалентах на миллион или миллиэквивалентах на литр (миллиграммы на литр / эквивалентный вес).

Глиняная составляющая почвы обладает ионообменными свойствами, которые играют важную роль в удерживании металлических микроэлементов и использовании их растениями по мере необходимости. Глиняная составляющая может также включать вспученные глины, например, бентонит. Высокое значение SAR влияет на состояние самого растения, глинистые минералы, обладающие ионообменной емкостью (что приводит к восстановлению металлических



плодовых культур может быть равно всего лишь четырем, тогда как для хлебных злаков и люцерны допустимое значение SAR=18. Однако наибольшую озабоченность вызывает не сама оросительная вода, а скорее основные свойства воды в корневой системе, где происходит концентрирование и нередко осаждение карбоната кальция. На Рис. 42.4 показано, как может изменяться состав оросительной воды при повышении концентрации в корневой системе в четыре раза. SAR воды в реке Колорадо у плотины Паркер Дем равен 2,52, а индекс Ланжелье составляет +1,05. Во второй колонке таблицы приведены данные анализа воды после повышения концентрации в четыре раза, это - обычная относительная концентрация почвенной воды на глубине примерно 12 дюймов ниже уровня грунтовых вод. Индекс Ланжелье увеличился до + 2,3, а SAR теперь равен 5,04. В корневой системе протекает ряд процессов, оказывающих влияние на фактический состав воды, в том числе, осаждение карбоната кальция и дыхание почвенных организмов с выделением CO<sub>2</sub>. В третьей колонке приведены данные анализа воды при условии, что индекс Ланжелье в результате осаждения карбоната кальция и выделения CO<sub>2</sub> при дыхании бактерий в количестве 65 мг/л достиг равновесия. Вследствие осаждения карбоната кальция относительный показатель адсорбции натрия (SAR) увеличился почти до шести.

Предлагается определять относительный показатель адсорбции натрия для почвенной влаги на основе SAR оросительной воды и относительной концентрации путем изменения индекса Ланжелье. Эта зависимость показана в приведенных ниже формулах:

$$pH_c = pK_2 - pK_c + p(Ca + Mg) + pAlk \quad (1)$$

$$PI \text{ (показатель осаждения)} = pH_{se} - pH_c \quad (2)$$

$$SAR_{se} = SAR_w \sqrt{CR} \cdot (1 + PI) \quad (3)$$

где:  $pH_c$  = равновесие pH оросительной воды при насыщении CaCO<sub>3</sub>  
 $pK_2$  = - log K<sub>2</sub>, вторая константа диссоциации H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>  
 $pK_c$  = - log K<sub>c</sub>, константа равновесия для CaCO<sub>3</sub>  
 $p(Ca + Mg)$  = - log (Ca + Mg), общая жесткость  
 $pAlk$  = - log Alk, общая щелочность  
 $CR$  = коэффициент упаривания  
 $se$  = почвенная вытяжка  
 $w$  = оросительная вода

Как указано выше, предполагается, что при таком изменении индекса, по мере концентрирования поглощенной воды в корневой системе, происходит осаждение магния и кальция в почве. Кроме того, обеспечивается возможность точного измерения величины pH воды в корневой системе.

Разумеется, одним из способов предотвращения концентрирования является выщелачивание почвы путем подачи избыточного количества воды для разбавления концентрата. Однако во многих районах, где проводится полив, существует дефицит воды и предотвращение концентрирования путем выщелачивания может оказаться неосуществимым. В случае недостаточного осушения почв избыточная вода может просто заполнить пустоты и ограничить приток воздуха к почвенным организмам.

В некоторых районах, где проводится орошение, иногда происходит повышение уровня грунтовых вод, и вода поступает в корневую систему. Если имеет место осаждение, снижающее водопроницаемость почвы, то ставится вопрос о совместности концентрированной оросительной воды с грунтовыми водами.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ДЛЯ ПОЧВОУЛУЧШЕНИЯ**

Рекомендуется соблюдать стандарты качества оросительной воды, в которых предельно допустимые концентрации всех элементов указаны также подробно, как и в стандартах качества питьевой воды. В Табл. 42.3 приведены рекомендуемые максимальные концентрации микроэлементов в оросительной воде.

В дополнение к этим общим рекомендациям для отдельных видов сельскохозяйственных культур предложено придерживаться установленных пределов в отношении минерализации воды и содержания в ней таких важных элементов, как бор.

**Таблица 42.3** Рекомендуемые предельно допустимые концентрации микроэлементов в оросительной воде\*

Элемент	При постоянном использовании воды для любых почв; мг/л	При использовании воды в течение не более, чем 20 лет, для почв с мелкозернистой структурой; pH = 6,0 - 8,5; мг/л
Алюминий	5,0	20,0
Мышьяк	0,10	2,0
Бериллий	0,10	0,50
Бор	0,75	2,0
Кадмий	0,010	0,050
Хром	0,10	1,0
Кобальт	0,050	5,0
Медь	0,20	5,0
Фторид	1,0	15,0
Железо	5,0	20,0
Свинец	5,0	10,0
Литий	2,5†	2,5†
Марганец	0,20	10,0
Молибден	0,010	0,050†
Никель	0,20	2,0
Селен	0,020	0,020
Олово‡		
Титан‡		
Вольфрам§		
Ванадий	0,10	1,0
Цинк	2,0	10,0

\* Эти предельно допустимые концентрации, как правило, не оказывают вредного воздействия на растения или почву.

† Рекомендуемое значение предельно допустимой концентрации при поливе citrusовых культур - 0,075 мг/л.

‡ Информацию об этих элементах см. *Water Quality Criteria*, публикация Управления охраны окружающей среды США (EPA) R.3-73-033, 1972, стр. 337-353.

§ Только для почв с мелкозернистой структурой или кислых почв с относительно высоким содержанием оксида железа.

Ввиду того, что для полива сельскохозяйственных культур вода обычно используется в больших объемах, обработка воды для удаления определенных компонентов с самого начала считалась невыгодной. В большинстве случаев проводится только обработка для обеспечения пороговых значений в целях (1) борьбы с накипеобразованием в распределительных системах и (2) предотвращения осаждения карбоната кальция в открытых водоводах, в которые в качестве удобрения добавляют аммиак. Добавление аммиака в оросительную воду с положительным индексом Ланжелье может стать причиной осаждения карбоната кальция, но этого можно избежать благодаря применению полифосфатов. В более новых системах капельного орошения, где вода для полива отдельных

растений используется в очень малых количествах, так как поступает в виде небольшого потока через отдельные распределительные устройства, постоянно существует угроза засорения. Для поддержания работоспособности таких систем может потребоваться осветление воды, обработка диспергаторами, добавление биоцидов или же применение сразу нескольких из вышеуказанных мер.

Использование сточных вод, выходящих с городских станций очистки воды, для орошения сельскохозяйственных угодий может отвечать интересам как городского, так и сельского хозяйства. Подтверждено, что орошение дождеванием является эффективным способом третичной очистки (доочистки) как городских, так и некоторых промышленных сточных вод, например, сточных вод предприятий пищевой промышленности. Не вызывает сомнений, что объем сточных вод, используемых для орошения, будет увеличиваться, и, если необходимо повышение качества выходящих сточных вод с учетом требований в отношении предельно допустимых концентраций таких компонентов, как тяжелые металлы, то затраты на применение определенных технологий дополнительной обработки воды на очистной станции, могут окупиться за счет экономии затрат оператором очистной станции на установку специального оборудования для доочистки воды.

Опреснение воды в реке Колорадо с целью улучшения ее качества в соответствии с требованиями мексиканских фермеров подтверждает растущий интерес к технологиям опреснения воды, поскольку качество воды в засушливых районах продолжает ухудшаться, а стоимость сельскохозяйственных культур растет.

### **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

---

Bower, C. A., Walcox, L. V., Akin G. W., and Keyes, M. C.: "Precipitation and Solution of Calcium Carbonate in Irrigation Operations," Soil Science Society of America, Proceedings 29 (1) and 93-94 (1965).

Croneis, C., and Krumbein, W. C.: *The Crust of the Earth*, in "Rocks and Minerals", Rapport, S., and Wright, H. (eds.), New American Library, New York, 1955.

*Environmental Studies Board: Water Quality Criteria-1972. A Report of the Committee on Water Quality*, EPA Publication R3-73-033, March 1973.

Salinity Laboratory Staff: U. S. Dept. of Agriculture: "Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils," Handbook 60, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1954.

Shoji, K.: "Drip Irrigation," *Scientific American*. 237,5 (1977).

Stumm, W., and Morgan, J.: *Aquatic Chemistry*, Wiley, New York, 1970.

---

## ГЛАВА 43

---

# ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

---

### ТЕОРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕФТИ

---

Согласно органической теории происхождения нефти, являющейся наиболее популярной гипотезой, источником водорода и углерода - сырьевых материалов для образования нефти - были микроскопические живые организмы, флора и фауна моря и приливно-отливной зоны. Менее распространенная теория заключается в том, что метан и, возможно, другие близкие к нему углеводороды образуются в мантии Земли и проникают в разломы и ловушки для нефти в земной коре. Эта теория находит поддержку благодаря совершенно недавно полученным данным о присутствии углеводородов в метеоритах и на более отдаленных планетах.

В соответствии с наиболее распространенной биологической теорией происхождения нефти и газа на протяжении многих миллионов лет реки в больших количествах переносили ил, песок и продукты поверхностной эрозии на дно морей и океанов, где они распределялись приливно-отливной водой и течениями. Под действием все возрастающей массы этих накапливающихся наносов дно океана медленно опускалось и сжималось, образуя осадочные породы, содержащие нефть, - песчаник, сланец, пористый известняк и доломит, смесь карбонатов кальция и магния.

В результате химических, физических и биологических воздействий из органических компонентов, представляющих собой захваченные микроскопические организмы, в течение миллионов лет образовалась нефть (Рис. 43.1).

Нефть природного происхождения имеет сложный и неодинаковый химический состав. Ее цвет может быть разным - от коричневого со слегка зеленоватым оттенком до черного. Она может представлять собой жидкость или быть очень вязкой, почти как твердое вещество. Исходя из основания нефти, химики-нефтяники разработали следующую классификацию сырой нефти:

1. *Нефть парафинового основания:* Высокое содержание масляных и парафиновых нефтяных фракций, содержащих в небольших количествах нафтены или нефтяной битум; низкое содержание соединений серы, азота и кислорода.
2. *Нефть асфальтового основания:* Высокое содержание битумного пека, нефтяного битума и тяжелого нефтяного топлива.
3. *Нефть смешанного основания:* Характеристики - средние между характеристиками нефти парафинового и асфальтового основания.
4. *Нефть ароматического основания:* Высокое содержание низкомолекулярных ароматических соединений и нафтен, содержащих в малых количествах нефтяной битум и смазочные масла.

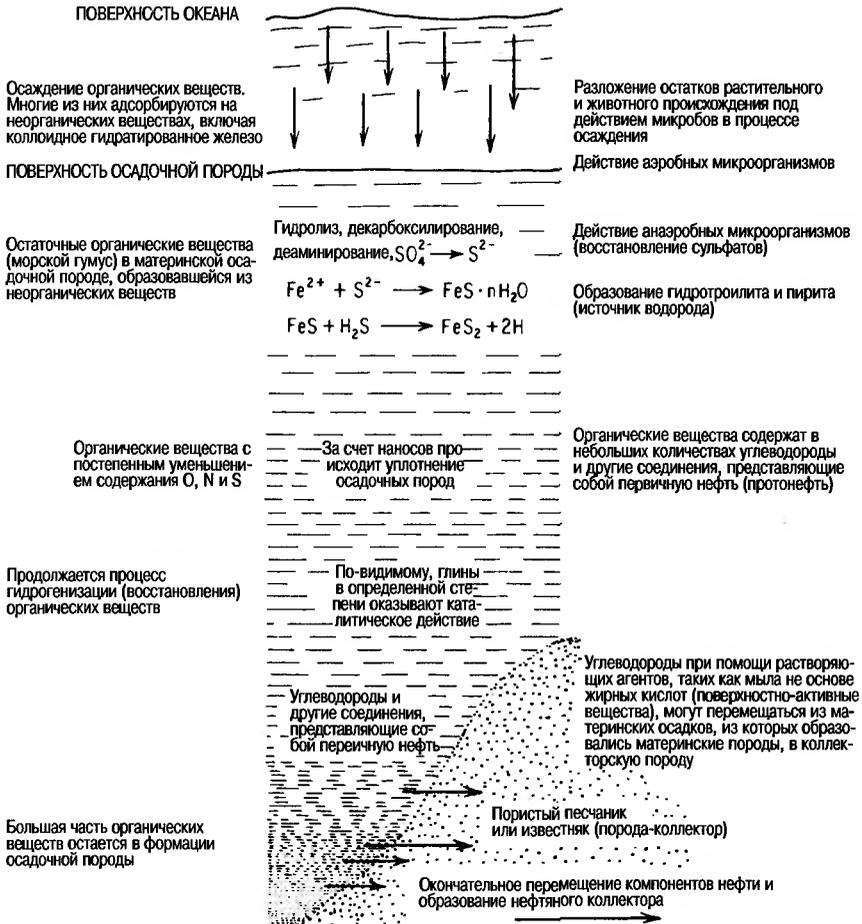


Рис. 43.1 Процесс образования нефти из органических наносов (Упрощенная схема из Davis J. B.: *Petroleum Microbiology, Elsevier, Амстердам, 1967.*)

Сырая нефть обычно идентифицируется по плотности в градусах Американского нефтяного института (API), между этой плотностью и удельным весом (S.G.) существует обратная зависимость:

$$\text{Плотность в градусах API} = \frac{141,5}{S.G.} - 131,5^\circ$$

Термин "плотность в градусах API" может привести в замешательство того, кто не знаком с терминологией, используемой в нефтяной промышленности. В нефтяной промышленности термин "сырая нефть с высоким значением плотности по шкале API" употребляется, когда речь идет о нефти с высоким содержанием летучих веществ и низким удельным весом (0,75 - 0,84), то есть ее плот-

## ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ность в градусах API находится в пределах 35 - 55°. "Тяжелая нефть" в ряде случаев имеет удельный вес, близкий к удельному весу воды, а плотность в градусах API при стандартной температуре 60°F (16°C) может быть равна 15°.

### НЕФТЕСОДЕРЖАЩИЕ ПЛАСТЫ-КОЛЛЕКТОРЫ

Нефть, которая обнаруживается только в пористых осадочных породах, перемещается в горизонтальном и восходящем направлении, достигая определенной локальной структуры или так называемой ловушки нефти, имеющей непроницаемую покрывающую породу, которая заполнена нефтью, и образуя пласт-коллектор.

Пласты-коллекторы нефти образуются в геологических структурах, имеющих самую различную форму, размеры и тип. Это могут быть: (1) куполообразные структуры и антиклинальные складки, (2) ловушки, обусловленные наличием сброса, (3) несогласные напластования, (4) куполообразные ловушки и ловушки с закупоренными трещинами и пустотами, (5) ловушки типа линз и (6) комбинированные ловушки. Складчатая структура с антиклинальными складками показана на Рис. 43.2, а ловушка, являющаяся результатом образования сбросов, - на Рис. 43.3.

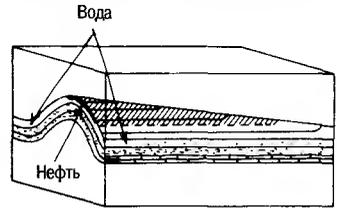


Рис. 43.2 Разделение воды и нефти в антиклинали, складчатой структуре с непроницаемой верхней частью (Публикация с разрешения Американского нефтяного института, из "Primer of Oil and Gas Production")

Длина и ширина пласта-коллектора могут составлять от одной до нескольких миль, а глубина - от нескольких футов до нескольких сотен футов. Объем пласта-коллектора площадью 1 акр (0,405 га) и глубиной 10 футов (3,05 м) составит 10 акров-футов; это - общепринятая единица измерения. Для определения количества нефти в пласте должны быть также известны общий объем порового пространства (пористость) и нефтенасыщенность коллектора в процентах (10 - 99 %). Остальная жидкость - это внутрипоровая (или погребенная) вода. По стандарту США мерой вместимости в нефтедобывающей промышленности является баррель (42 галлона; 5,62 куб. футов; 0,16 куб. метров).

Пласт-коллектор объемом 10 акров-футов вмещает 435600 куб. футов (12327 м<sup>3</sup>). При пористости 20 % и нефтенасыщенности 80 % он будет содержать:

$$435\ 600 \times 0,2 \times 0,8 = 69\ 696 \text{ куб. футов нефти (1972 м}^3\text{)} = 12\ 424 \text{ баррелей}$$

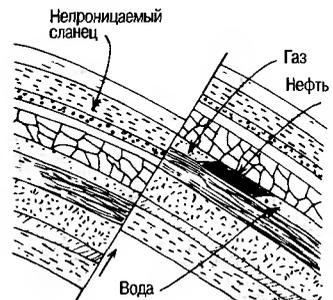


Рис. 43.3 Разделение воды и нефти на участках разлома, перемещение пластов вдоль плоскости разлома (Публикация с разрешения Американского нефтяного института, из "Primer of Oil and Gas Production")

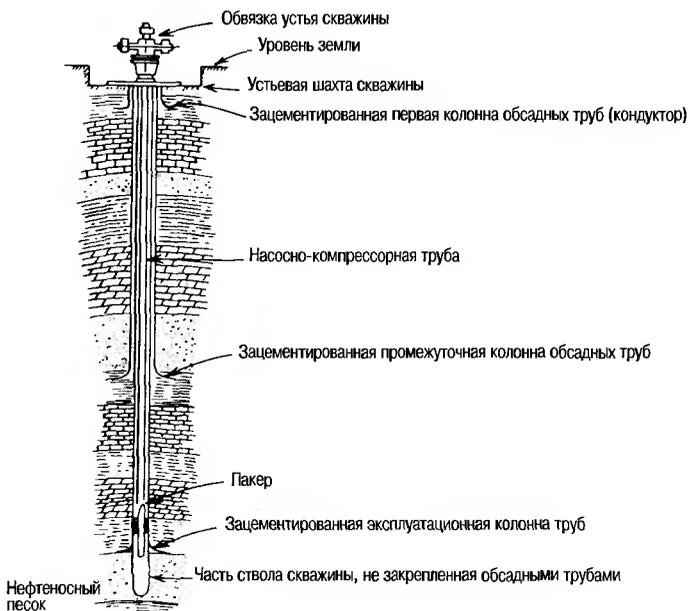
**ДОБЫЧА НЕФТИ**

При прохождении бура в пласт нефть и газ под действием естественного пластового давления вытесняются на поверхность. Такая добыча нефти первичным методом, за счет давления коллектора, осуществляется в течение нескольких месяцев или лет.

Конструкция фонтанирующей скважины состоит из "колонны" концентричных вертикальных труб, так называемой колонны обсадных труб (обсадной колонны), и трубы меньшего диаметра, обычно 2-3 дюйма (5 - 7,5 см), которую называют насосно-компрессорной трубой, по ней поступает добытая жидкость. Обсадная колонна наибольшего диаметра (кондуктор, первая колонна обсадных труб) устанавливается до глубины 200 - 1500 футов (61 - 460 м); промежуточная колонна труб (техническая колонна труб) может достигать глубины до 5000 футов (1530 м); третья обсадная колонна (эксплуатационная колонна труб) может достигать продуктивной зоны. Продуктивные зоны могут находиться на глубине 20000 футов (6100 м) и более. Для защиты насосно-компрессорной трубы в разрабатываемом нефтеносном пласте служит пакер, он уплотняет зазор между насосно-компрессорной трубой и последней обсадной колонной (Рис. 43.4). Иногда в промежуточной колонне устанавливают перфорированные трубы, что обеспечивает возможность одновременной добычи в нефтеносных зонах, находящихся на меньшей глубине.

Ряд задвижек и фланцев в обвязке устья скважины (так называемая "Рождественская елка") имеет небольшую измерительную диафрагму (так называемый "устьевый штуцер") (Рис. 43.5) для регулирования фонтанирования.

При уменьшении естественной энергии коллектора для продолжения добычи применяют определенный метод насосной эксплуатации скважины (Рис. 43.6).



**Рис. 43.4** Типичная конструкция обсадной колонны, обсадных труб и насосно-компрессорной трубы в нефтяной скважине (Публикация с разрешения Американского нефтяного института из "Primer of Oil and Gas Production")

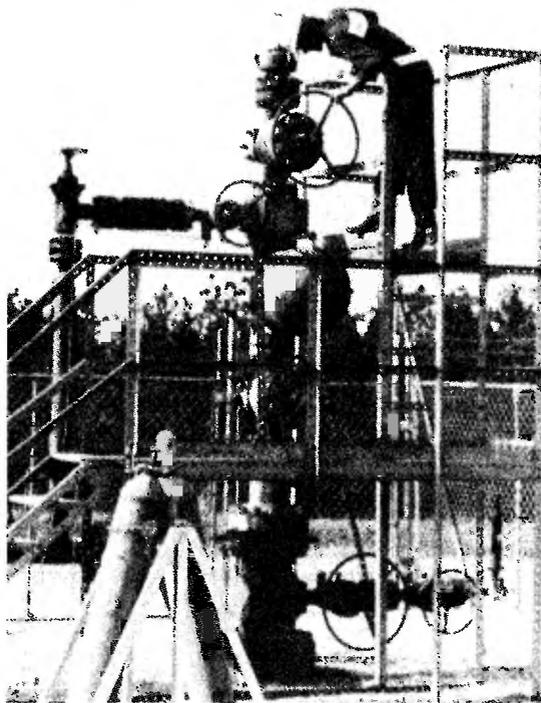


Рис. 43.5 Для монтажа этой большой "Рождественской елки" были использованы 4-дюймовые задвижки и трубные фитинги, рассчитанные на рабочее давление 10 000 фунтов/кв. дюйм (Публикация с разрешения of McEvoy Oilfield Equipment Company)

### Обезвоживание нефти

Выходящая из добывающей скважины нефть представляет собой смесь жидких углеводородов, природного газа и пластовой воды (Рис. 43.7). На ранней стадии первичной добычи нефти содержание в ней воды может быть незначительным. Однако в большинстве случаев доля воды в добытой нефти является весьма значительной (до 90 %). Эта вода должна быть отделена от нефти, так как в технических условиях на трубопроводы указано максимальное водосодержание - не более 1 %, хотя в некоторых местах - до 3-4 %.

Емкость для первоначального отделения воды на современных установках для подготовки нефти носит название сепаратор свободной воды, добываемой с нефтью (FWKO) (Рис. 43.8). Свободная вода, то есть, вода, которая отделяется в течение 5 минут, отводится в отстойник для осветления перед повторным закачиванием или сбросом. Оставшаяся нефть обычно содержит эмульгированную воду и подлежит дальнейшей обработке для разрушения эмульсии, обычно при помощи тепловой или электрической энергии, или с одновременным использованием энергии этих двух видов.

Подогреватели-сепараторы (Рис. 43.9) представляют собой вертикальные или горизонтальные аппараты, в которых эмульсия типа "вода в нефти" (водо-нефтяная эмульсия) разрушается при помощи химических веществ - деэмульга-



Рис. 43.6 Этот скважинный нефтяной насос представляет собой насосную установку с балансиром. Широко используются также скважинные центробежные насосы.

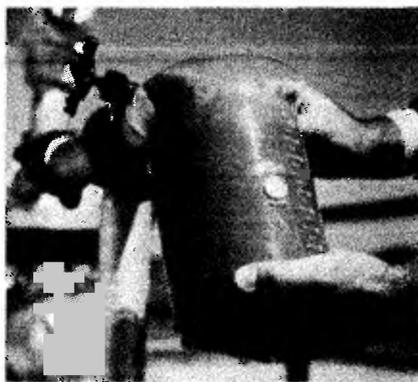
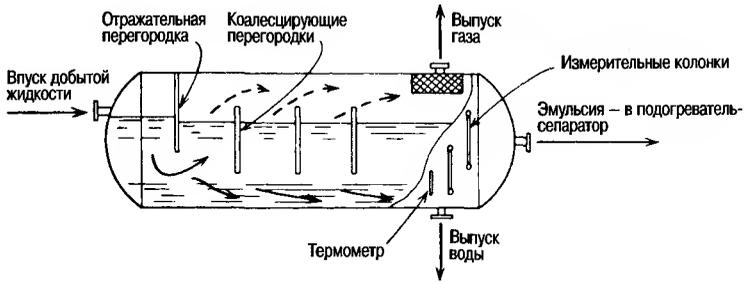


Рис. 43.7 Добытая нефть почти всегда представляет собой эмульсию, по внешнему виду очень сильно отличающуюся от товарных нефтепродуктов.

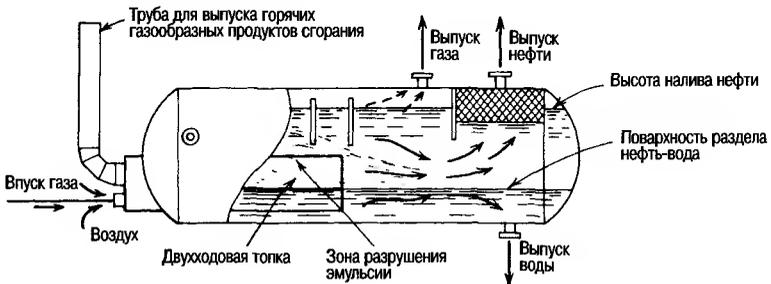
торов. В аппарате для электростатической обработки используется теплота, а также переменный ток высокого напряжения для заряда капель воды, что способствует ускорению процесса слияния мелких капелек в крупные капли. Дезэмульгированная сырая нефть перетекает в резервуар для товарной нефти для транспорта нефти по трубопроводу на нефтеперерабатывающий завод.

### **Добыча нефти вторичным методом**

Под добычей нефти вторичным методом следует понимать добычу нефти при искусственном поддержании энергии пласта, осуществляемую после завершения периода ее добычи первичным методом. Для этого применяются такие тех-



**Рис. 43.8** В таком аппарате гравитационного разделения свободная вода и газ отделяются от добытой жидкости, упрощая тем самым задачу разрушения эмульсии (Публикация Американского нефтяного института из "Treating Oil Field Emulsions")



**Рис. 43.9** В таком подогревателе-сепараторе используется теплота сжигания газа или нефти для подогрева эмульсии из барабанного сепаратора свободной воды, а также химическая обработка для выхода нефти с минимальным содержанием воды (Публикация с разрешения Американского нефтяного института из "Treating Oil Field Emulsions")

нологии, как искусственное заводнение нефтяного месторождения, нагнетание природного газа в коллектор нефти и другие технологии, основанные на нагнетании жидкости или какого-либо теплоносителя при добыче нефти вторичным или третичным методом.

Добыча нефти вторичными методами - это любая добыча нефти вторичным методом, впервые осуществляемая в пласте-коллекторе. Она обычно осуществляется после завершения периода первичной добычи, но может проводиться и параллельно, в течение этого периода. При добыче нефти вторичными методами наиболее широко применяется заводнение.

Добыча нефти третичными методами – это добыча с искусственным поддержанием энергии пласта, осуществляемая после завершения вторичных технологических операций с целью полного отбора оставшейся в коллекторе нефти. После завершения добычи нефти первичным и вторичным методом в пласте еще может оставаться 50 % начального содержания нефти.

### Добыча нефти вторичными методами с применением заводнения

Заводнение – это нагнетание воды в пласт в виде равномерного барьера, проходящего через продуктивный пласт; нагнетание осуществляется из ряда нагнетательных скважин в направлении добывающей скважины. Такими нагнетательными скважинами могут служить либо добывающие скважины, превращенные

в нагнетательные, либо новые скважины, пробуренные специально для нагнетания в пласт воды при заводнении месторождения.

Важным фактором является правильное размещение нагнетательных скважин. В большинстве случаев пласты заводняют при помощи скважин, равномерно распределенных по пласту. При заводнении можно также использовать периферийные нагнетательные скважины.

Типичная схема размещения, так называемая пятиточечная сетка размещения скважин, представлена на Рис. 43.10. Плотность размещения скважин (площадь участка, ограниченного периметром пятиточечной сетки размещения скважин)

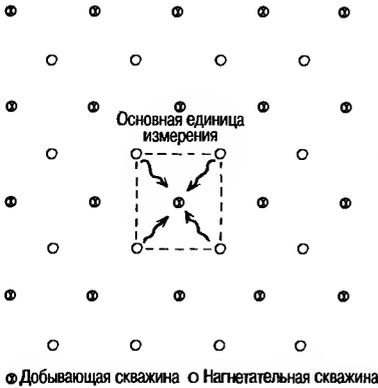


Рис. 43.10 Типичная 5-точечная схема размещения скважин.

может составлять 3 акра, 5 акров и более; определение наиболее эффективной плотности размещения скважин - задача инженера-разработчика нефтяных месторождений.

Пригодность коллекторской породы к заводнению непосредственно зависит от ее проницаемости. Горная порода считается проницаемой, если значительный объем жидкости проходит через нее за короткий период времени, и непроницаемой - при малой скорости прохождения жидкости.

Единицей проницаемости является дарси ( $1,02 \times 10^{-12} \text{ м}^2$ ); в соответствии со стандартом Американского нефтяного института: "Пористая среда имеет проницаемость 1 дарси, если однофазная жидкость, имеющая вязкость один сантипуаз и полностью заполняющая пустоты (или поры)

среды, проходит через нее со скоростью один сантиметр в секунду на площади поперечного сечения, равной одному квадратному сантиметру, при давлении или эквивалентном гидравлическом градиенте, равном одной атмосфере (760 мм рт. ст.) на сантиметр".

Проницаемость зерна породы обычно находится в пределах 5 - 1000 миллидарси (1 md = 0,001 d). Для того чтобы получить приблизительное представление, приведем такой пример: 1 куб. фут ( $0,0283 \text{ м}^3$ ) песчаника, пропускающего приблизительно один баррель нефти ( $0,16 \text{ м}^3$ ) в сутки при падении давления 1 фунт/кв. дюйм (0,068 бар,  $0,0703 \text{ кг/см}^2$ ) имеет проницаемость, равную 1 дарси (1 d).

Проницаемость и пористость типичной породы-коллектора очень сильно изменяются при продвижении как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Породу, имеющую проницаемость не более 5 md, в зависимости от ее состава называют "плотный песок" или "плотный известняк". Ниже приведены приблизительные характеристики проницаемости:

1 - 10 md	Неплохая проницаемость
10 - 100 md	Хорошая проницаемость
100 - 1000 md	Очень хорошая проницаемость

Для эффективного заводнения пласта необходима полная совместимость пластовых и закачиваемых вод. Поэтому желательно использовать пластовую воду после ее отделения от нефти и газа. Однако, необходимый для заводнения объем воды значительно превышает объем добытой пластовой воды, поэтому требуется дополнительное количество воды.

Добытая пластовая вода и дополнительно используемые поверхностные воды должны быть очищены с целью удаления остаточных скоплений нефти, пес-

## ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ка или грязи, вымываемых из разрабатываемого нефтеносного пласта, окисленных неорганических или органических взвешенных веществ или продуктов коррозии. Качество воды, используемой для заводнения, определяется в зависимости от проницаемости породы-коллектора. В настоящее время для очистки воды наиболее широко применяется флотационная камера, в которой очистка воды проводится путем газовой диффузии.

При нагнетании в пласт поверхностных вод или артезианской воды, соленость которой ниже, чем соленость пластовой воды, может иметь место химическая несовместимость с породой-коллектором. Это может стать причиной набухания глин в коллекторской породе. С давних пор пригодность нагнетаемой воды определяют путем анализов воды, которую предполагается использовать, при помощи мембранной фильтрации или лабораторных исследований кернов пластов. Все эти методы имеют один недостаток: вода после удаления из пласта попадает в другие условия, что может привести к изменению ее состава.

Для определения стандартов качества нагнетаемой воды (Рис. 43.11) была разработана установка, обеспечивающая возможность проведения анализов в полевых условиях. Благодаря этому исключаются какие-либо изменения в составе воды при отборе проб, анализе или перевозке и хранении. При изучении влияния химических добавок и условий фильтрации используется порода пласта.

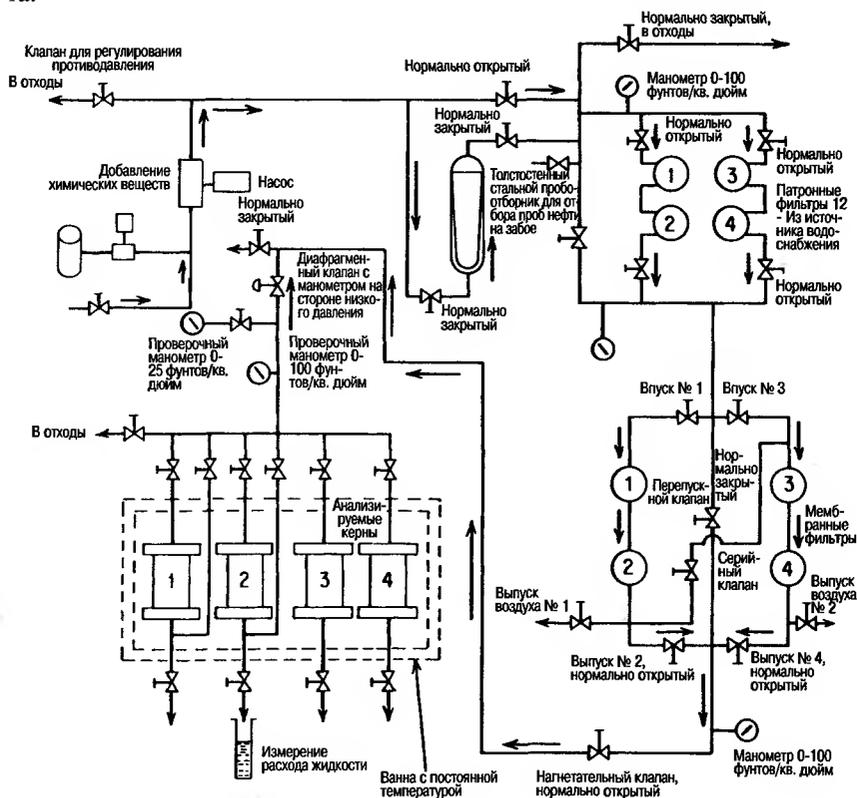
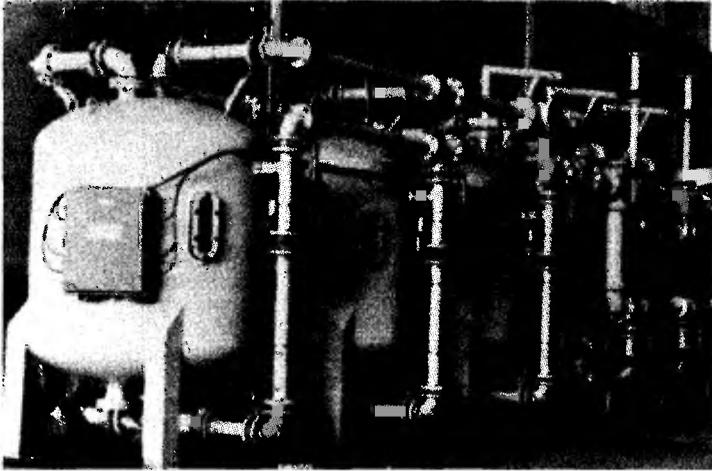


Рис. 43.11 Установка для определения проницаемости и тенденции к закупорке пор зерна пласта при нагнетании в него воды определенного качества (Из McCune, C. C.: "On Site Testing to Define Injection Water Quality Requirements." Публикация Общества инженеров-нефтяников CIPA 5865.)



**Рис. 43.12** При эксплуатации месторождения с применением заводнения для предотвращения закупорки трещин и пор породы в скважине используются песочные и мембранные фильтры. (Публикация с разрешения L\*A Water Conditioning Company.)

В большинстве случаев воду, предназначенную для нагнетания в пласт, пропускают через фильтр определенного типа; фильтрующую среду и конструкцию фильтра выбирают в зависимости от проницаемости пласта. Среди применяемых типов фильтров - фильтры со смешанными фильтрующими слоями, патронные фильтры для отдельных скважин или мембранные фильтры, в которых в качестве вспомогательного материала для образования фильтрующего слоя используется диатомовая земля (Рис. 43.12). В некоторых случаях может появиться необходимость проведения более тщательной очистки, например, осветления или умягчения известью. Для уменьшения степени коррозии или предотвращения окисления железа может потребоваться деаэрация (Рис. 43.13).

### **ДОБЫЧА НЕФТИ ВТОРИЧНЫМИ МЕТОДАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НАГНЕТАНИЯ ПАРА В ПЛАСТ**

При добыче нефти вторичными методами технология заводнения может оказаться неэффективной в тех случаях, когда нефть имеет низкую плотность в градусах Американского нефтяного института и ее добывают из относительно неглубоко залегающих нефтяных пластов при температурах ниже примерно 120°F. В таких случаях применяют технологию нагнетания пара в пласт. Иногда пар используется для возбуждения нефтяной скважины. Скважина выводится из эксплуатации и в течение нескольких недель в нее нагнетают пар для нагрева нефтеносных пород; затем нефтяную скважину вновь вводят в эксплуатацию и продолжают добычу нефти до тех пор, пока снова не потребуется ее возбуждение. (Такой способ обработки паром известен под названием "huff-and-riff" (метод циклического нагнетания пара в ствол скважины). Однако, наиболее широко применяется такой метод обработки паром, как ввод пароводяной смеси из прямогочного парового котла в одну из используемых для вытеснения нефти скважин в группе скважин, расположенных в центральной части, с последующим расхождением пара и горячей воды в направлении периферийных нефтяных скважин, обслуживаемых каждой из этих нагнетательных скважин.

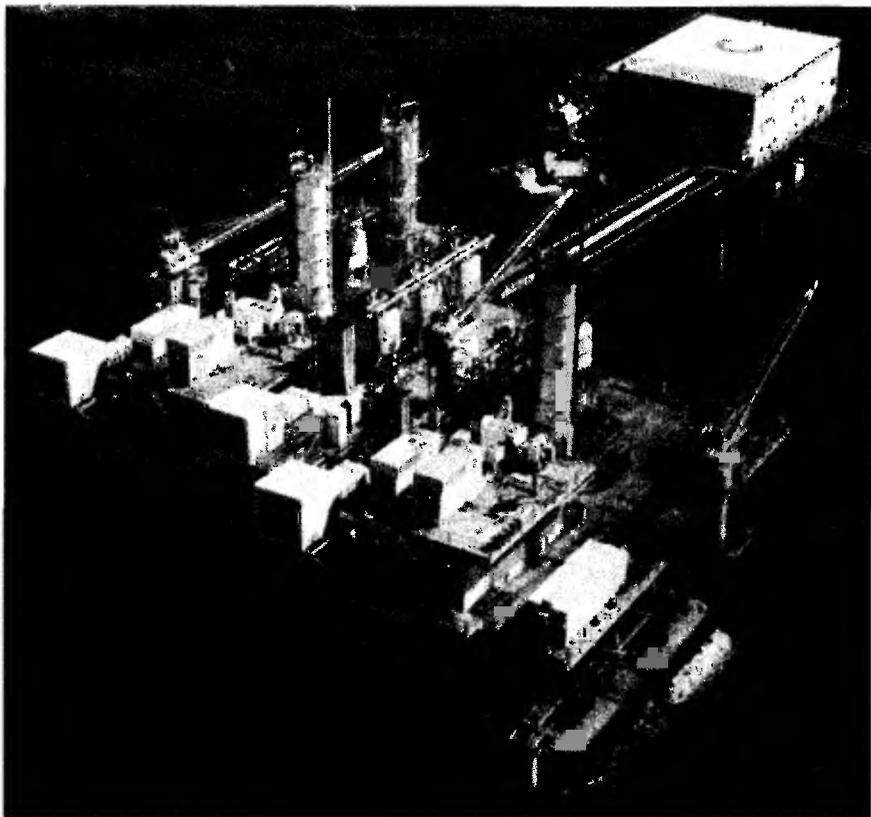


Рис. 43.13 На этой морской буровой установке для удаления растворенного кислорода из воды, используемой при добыче нефти вторичными методами, применяются вакуумные дегазаторы. (Публикация с разрешения Infilco Degremont Inc.)

В долине реки Имперьяль, в Центральной Калифорнии, добыча сырой нефти, имеющей плотность в градусах Американского нефтяного института примерно 11-13 и залегающей в очень рыхлой породе на глубине от 500 до 1500 футов, осуществляется методом вытеснения путем нагнетания пара. В Соединенных Штатах этот район является крупнейшим районом добычи нефти с применением обработки паром; общий объем добычи нефти с применением этой технологии в Калифорнии составляет около 375000 баррелей в сутки. Примерно 30 % добываемой сырой нефти используется в качестве топлива в паровых котлах, хотя иногда для производства пара применяются газовые котлы, работающие в непрерывном или повторно-кратковременном режиме, обеспечивающем выполнение установленных норм выбросов.

Со временем на любой площадке, где добыча нефти ведется с нагнетанием пара, наблюдается постепенное повышение температуры добытой жидкости примерно до 160-180°F (71 - 82°C). Скважины выдают от 6 до 8 баррелей воды на баррель нефти. Разделение нефти и воды проводится в отстойниках с применением деэмульгаторов; затем должна быть проведена обработка воды с целью ее использования в качестве питательной воды паровых котлов или сброса. Соленость и химические свойства попутно добываемой воды в разных местах до-

Таблица 43.1\* Данные анализа воды из различных пластов

Штат	Округ	Месторождение	Na	Ca	Mg	Компоненты, мг/л			НСО <sub>3</sub>	Содержание
						Cl	SO <sub>4</sub>	НСО <sub>3</sub>		
Оклахома	Кингфишер	Освего	56250	8300	260	98300	180	50	166652	
Канзас	Эллис	Арбакл	16800	2630	690	30500	2880	315	54072	
Нью-Мексико	Ли	Сан-Андрес	9150	1500	500	17800	2000	1000	32329	
Техас	Хопкинс	Палакси	5640	630	40	8350	120	500	15417	
Калифорния	Керн †		3936	124	66	5800	216	73	10159	
Калифорния	Керн	Керн	6725	235	115	10714	216	52	18382	
Калифорния	Керн (река Керн)		184	25	5	170	65	234	620	

\* Форма представления данных анализа воды, рекомендуемая Американским нефтяным институтом, показана на Рис. 43.14.

† При применении технологии нагнетания пара эти нефтепромысловые минерализованные пластовые воды подвергаются обработке и используются в качестве питательной воды для паровых котлов, работающих при давлении 800-1000 фунтов/кв. дюйм.



появления проблем может быть и гипс (сульфат кальция). Затем проводится доочистка воды при помощи мембранных фильтров (Рис. 43.12). (См. также Рис. 11.11). Можно использовать различные вспомогательные материалы для образования фильтрующего слоя, в том числе, целлюлозу, обработанную по специальной технологии, диатомовую землю (DE) и вермикулит. Сначала посредством рециркуляции происходит намывка фильтрующего слоя; затем фильтр приводится в действие при постоянном добавлении вспомогательного материала для образования фильтрующего слоя в количестве 2 - 3 мг/л /1 мг/л нефти.

После фильтрации вода направляется на установки для цеолитового умягчения (Рис. 43.15). Высокое содержание солей в пластовой воде затрудняет процесс умягчения, поэтому почти всегда после установки для первичного умягчения вода подается на установку доумягчения, для того чтобы обеспечить нулевую жесткость очищенной воды. Затем умягченная вода направляется к различным паровым котлам, установленным на разных участках нефтяного месторождения и иногда удаленным на несколько миль.

Необычно то, что паровой котел является прямоточным (Рис. 43.16). Питательную воду подогревают (во избежание подшламовой коррозии в экономайзере), а затем пропускают через экономайзер для рекуперации тепла топочного газа. После этого питательная вода проходит через радиационную и конвекционную секции парового котла, где производится пар. Однако в отличие от обычных барабанных котлов, качество выходящей из котла жидкости - 80 %; это означает, что содержание пара в нем составляет 80 вес. %, а воды - 20 вес. %. Так как объем пара при давлении 900 фунтов/кв. дюйм равен 0,49 куб. футов/фунт, а удельный объем воды - только 0,021 куб. футов/фунт, выходящая жидкость содержит 99 об. % пара и только 1 об. % воды.

Однако в воде, содержащейся в выходящем паре, присутствуют все твердые вещества, которые присутствовали в питательной воде котла. При получении пароводяной смеси с содержанием пара 80% из 5 фунтов питательной воды получают 4 фунта пара и 1 фунт воды, следовательно, концентрация твердых веществ повышается в 5 раз. Зависимость между качеством пара и концентрацией выражается следующей формулой:

$$CR \text{ (коэффициент упаривания)} = \frac{100}{100 - \text{качество}}$$

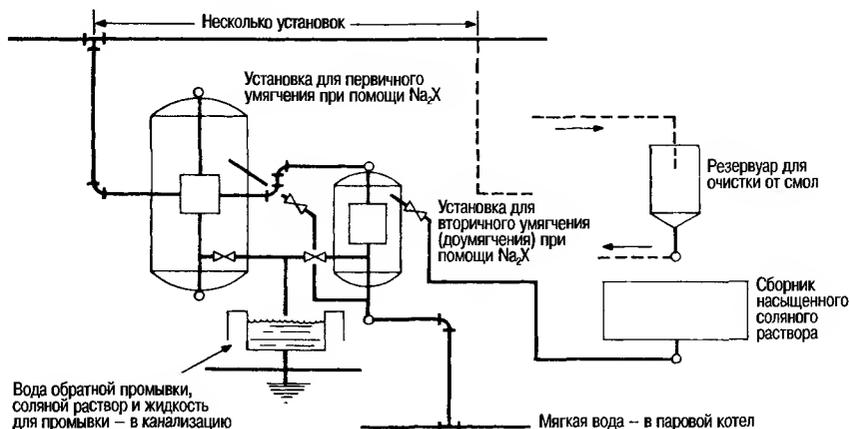


Рис. 43.15 Двухступенчатый процесс умягчения пластовой воды при помощи натриевого цеолита после очистки ее от нефти и фильтрации с целью последующего использования в котлах высокого давления.

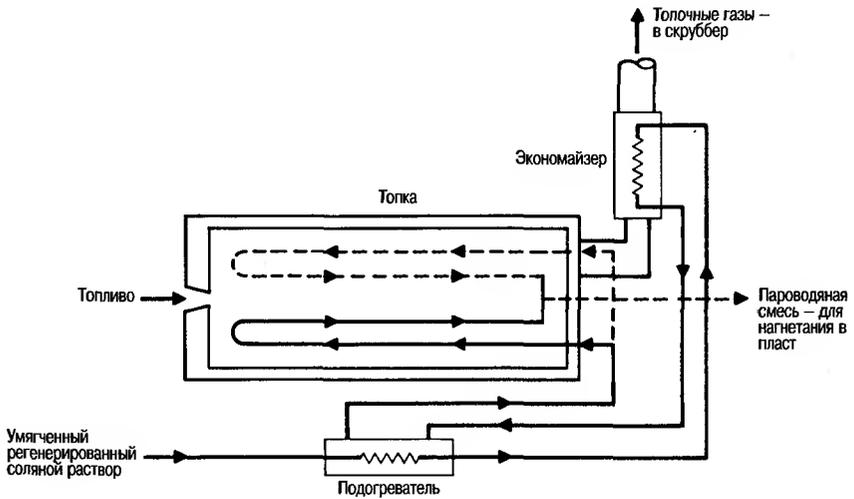


Рис. 43.16 Прямоточный паровой котел высокого давления, производящий пар для добычи нефти с низким значением плотности по шкале Американского нефтяного института (тяжелой нефти) в нижней Калифорнии с применением нагнетания пара.

В зависимости от глубины нагнетательной скважины и проницаемости пласта рабочее давление паровых котлов может составлять от 300 фунтов/кв. дюйм до 1000 фунтов/кв. дюйм (68 бар). Такое давление поддерживается при помощи питательных насосов котла.

Так как в паровых котлах обычно сжигают добытую сырую нефть, топочные газы подвергаются мокрой очистке в скрубберах для удаления  $SO_2$  и  $NO_x$ . При повышении концентрации подпиточной воды скруббера ее обычно подвергают обработке противовспенивающими веществами и диспергаторами, чтобы уменьшить образование накипи, содержание примесей в рециркуляционной воде и препятствия на пути потока газов, что могло бы привести к нарушению режима работы топки.

## **ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДЫ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

После определения качества нагнетаемой воды необходимо принять меры по борьбе с накипеобразованием, коррозией и загрязнением наземного оборудования, резервуаров и трубопроводов для предотвращения перерывов в подаче нагнетаемой воды или снижения добычи нефти.

Для идентификации и оценки этих возможных проблем необходимо проведение ряда анализов. Анализы следует проводить в разных местах системы водоснабжения, так как изменения в системе дают информацию о том, как следует вести борьбу с вышеуказанными явлениями. Работа по проверке системы заводнения начинается с добывающей скважины, так как именно здесь появляются первые изменения в составе воды. Когда вода поступает в эксплуатационную насосно-компрессорную колонну, происходит падение давления, что может стать причиной осаждения либо в колонне насосно-компрессорных труб, либо в пласте. При приближении добытой жидкости к поверхности дальнейшее падение давления вызывает выделение газов и снижение температуры.

Вода нефтяных месторождений характеризуется: (1) солесодержанием, (2) взвешенными веществами, (3) растворенными газами, (4) бактериями, являющимися причиной возникновения различных проблем, и (5) остаточным нефте-содержанием.

**Общее солесодержание (TDS)**

Общее солесодержание (TDS) в нефтепромысловых минерализованных пластовых водах может изменяться в пределах < 10000 мг/л - > 350000 мг/л, причем содержание NaCl составляет не менее 80%. Определенные проблемы могут вызывать обнаруживаемые в воде нефтяных месторождений катионы кальция (Ca), магния (Mg), бария (Ba), стронция (Sr) и ионы железа (Fe). Часто встречаются анионы хлорида (Cl), сульфата (SO<sub>4</sub>), бикарбоната (HCO<sub>3</sub>) и сульфида (S).

Кроме того, при анализах часто обнаруживают калий (K), литий (Li), бор (B), цинк (Zn) и медь (Cu). Несколько типичных составов минерализованных пластовых вод указаны в Табл. 43.1. Такое указание, как "в виде карбоната кальция", важное для инженеров, использующих поверхностные воды, при использовании воды нефтяных месторождений практически не встречается. В стандартной форме представления данных анализа воды, разработанной Американским нефтяным институтом (Рис. 43.17), данные представлены в табличной и графической форме.

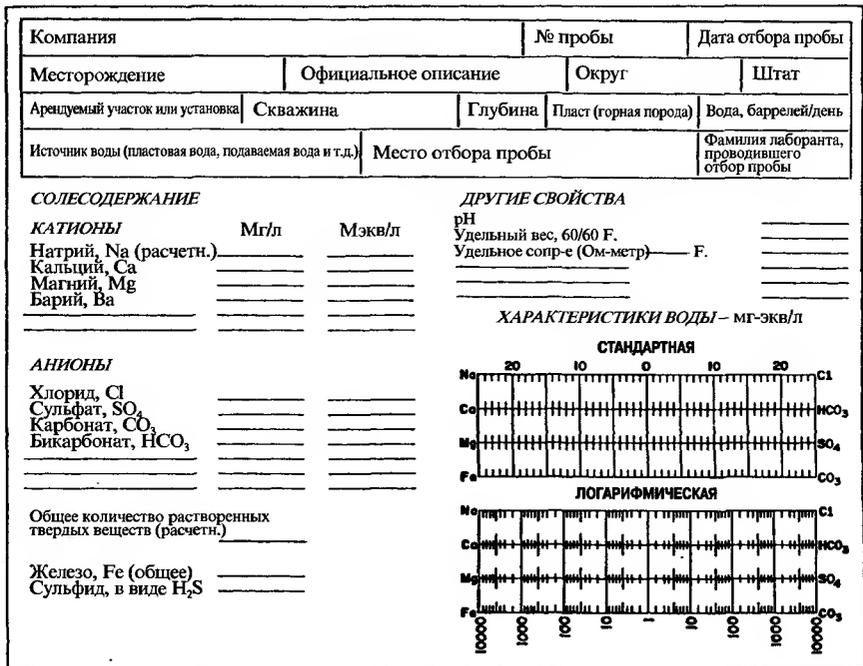


Рис. 43.17 Форма представления данных анализа воды, разработанная Американским нефтяным институтом (Публикация с разрешения Американского нефтяного института, из API RP 45, "API Recommended Practice for Analysis of Oil-Field Waters.")

**Взвешенные вещества**

В нефтяных водах обнаруживают различные неорганические и органические твердые вещества. Это могут быть частицы оксидов металлов из обсадных труб или окисленное железо или марганец, первоначально содержащиеся в воде. В воде могут присутствовать и другие взвешенные вещества, например, ил, песок, глина или бактерии. Эти частицы задерживаются мембранным фильтром 0,45 мкм и могут быть идентифицированы. Отфильтрованные твердые вещества анализируют отдельно (Рис. 43.18). Высокая концентрация экстрагируемых веществ, растворимых в фреоне, обычно указывает на недостаточную степень де-

		<p><b>ОТЧЕТ ЛАБОРАТОРИИ СЛУЖБЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОМПАНИИ NALCO</b></p>	
Место отбора пробы: <span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span> <span style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</span>	ДАТА: 1-4-78 № АНАЛИЗА: 76V-2495, B ДАТА ОТБОРА ПРОБЫ: 12-28-77 ДАТА РЕГИСТРАЦИИ ПРОБЫ: 12-28-77		
МАРКИРОВКА ПРОБЫ: вода для нагнетания			
ДАВЛЕНИЕ (избыточное давление в футах/кв. дюйм)		0	
ОБЪЕМ ПРОБЫ ДЛЯ АНАЛИЗА (миллилитры)		1000	
ЭКСТРАГИРУЕМЫЕ ВЕЩЕСТВА (мг/л)			
Растворимые в воде		56,4	
Растворимые в фреоне		12,2	
Растворимые в соляной кислоте		3,8	
Железо (Fe)		0,5	
Кальций (Ca)		0,3	
ОСТАТОК (мг/л)			
Суммарный остаток		5,8	
SiO <sub>2</sub> и/или BaSO <sub>4</sub>		2,2	
ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ФИЛЬТРУЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ		78,2	

Рис. 43.18 Данные анализа взвешенных твердых веществ.

эмульгирования или осветления воды, которую предполагается использовать для нагнетания. К веществам, растворимым в соляной кислоте, относятся карбонаты кальция, магния и железа, а также оксиды и сульфиды железа. После обработки воды возможно остаточное содержание таких веществ, как диоксид кремния, сульфат бария, сульфат кальция или тяжелые углеводороды, например, асфальтены, которые почти нерастворимы в растворителях. В воде могут также оставаться бактерии.

### Растворенные газы

Наибольшее беспокойство вызывает присутствие в воде таких газов, как сероводород ( $H_2S$ ), углекислый газ ( $CO_2$ ) и кислород ( $O_2$ ).

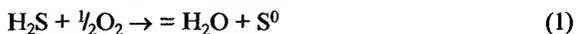
Пластовые воды, содержащие сероводород, называют кислыми водами. Нефтяные пласты могут становиться кислыми в результате деятельности сульфатвосстанавливающих бактерий в продуктивных пластах. Концентрация  $H_2S$  может достичь нескольких сотен миллиграммов на литр. Во многих районах страны для удаления этого газа из пластовой воды перед повторным закачиванием применяют сложные механические системы.

Сероводород – очень ядовитый газ, поэтому все нефтедобывающие компании, эксплуатирующие месторождения нефти с высоким содержанием серы, должны устанавливать на нефтяных резервуарах и цистернах обращаемые на себя внимание знаки, предупреждающие о том, что при инспекции следует использовать средства защиты дыхания.

При контакте  $H_2S$  с железом образуется сульфид железа, который может ускорять коррозию или вызывать сильное засорение. Сульфиды большинства металлов нерастворимы в воде.

Образование  $H_2S$  возможно и в системе обработки воды под действием сульфатвосстанавливающих бактерий. Любое повышение концентрации  $H_2S$  в системе водоснабжения, не обусловленное смешением, является признаком микробной деятельности.

При контакте  $H_2S$  с растворенным кислородом возможно образование элементарной серы, которая также может привести к сильному засорению.



*Углекислый газ* ( $CO_2$ ) способен образовывать при растворении в воде слабую угольную кислоту. Это – одна из основных причин коррозии эксплуатационных скважин и систем заводнения. Концентрация  $CO_2$  в эксплуатационной скважине может превышать 200 мг/л; при выходе добытой жидкости из скважины большая часть углекислого газа выделяется в атмосферу. Кроме того, под действием углекислого газа растворяется известняк, что приводит к повышению жесткости и щелочности.

*Растворенный кислород* ( $DO$ ) редко присутствует в добытой из пласта-коллектора жидкости; он может появиться только вследствие утечек, однако именно кислород, по-видимому, является наиболее сильным корродирующим веществом в механизме коррозии водой нефтяных месторождений.

Кислород участвует также в образовании закупоривающих веществ, окисляя двухвалентное железо и сероводород. Следует принять необходимые меры, чтобы не допустить присутствия кислорода в резервуарах, обсадных колоннах и наземных подводящих трубопроводах.

### Бактерии, являющиеся причиной появления проблем

Из нескольких видов бактерий, способствующих развитию коррозии или образованию закупоривающих твердых веществ, наибольшую опасность представляют анаэробные сульфатвосстанавливающие бактерии, *Desulfovibrio desul-*

## ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

figicans. Для обнаружения этих бактерий уже давно применяется методика последовательного или "затухающего" разбавления. Недостаток этой методики состоит в том, что для получения положительного результата может потребоваться от 7 до 30 дней.

Новая методика заключается в том, что бактерии, выделенные из пробы воды на прокладке фильтра (фильтр 0,45 мкм), немедленно погружаются в кипящую воду, содержащую буферный раствор; при этом происходит разрушение ферментов, обычно сопровождающееся поглощением АТФ (аденозинтрифосфата). Сохраненный АТФ реагирует с такими ферментами, как люциферин и люцифераза, в фотометрической ячейке, и по образованию фотонов в течение нескольких минут после отбора пробы определяют всю бактериальную флору.

### Остаточная нефть

Для качественного определения остаточной нефти рекомендуется метод экстракции фреоном с последующим взвешиванием. Этот метод требует больших затрат времени, что ограничивает его применение при текущем контроле.

Хорошую информацию об изменениях концентрации нефти в системе водоснабжения можно получить при помощи применяемого в полевых условиях метода экстракции хлороформом. Во многих случаях этот метод обеспечивает почти такое же качество анализа, что и при лабораторных методах экстракции. В простом спектрофотометре проводят сравнение экстрагированного хлороформом углеводорода с подготовленными образцами. Этот метод используется при определении остаточного содержания сырой нефти, имеющей определенный цвет.

### НАКИПЬ, ОБРАЗУЕМАЯ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ СОЛЯМИ

Наибольшее беспокойство у нефтепромышленников вызывает присутствие таких накипеобразующих солей, как карбонат кальция, сульфат кальция и сульфат бария. Проблемы может вызывать и не так часто обнаруживаемый в воде сульфат стронция. Кроме того, в связи с возможностью развития коррозии и окисления двухвалентного железа вследствие интрузии кислорода причиной беспокойства может быть и содержание некоторых соединений железа. В Табл. 43.2 приведен перечень наиболее часто встречающихся накипеобразующих солей и указаны параметры системы, влияющие на их образование.

Таблица 43.2 Наиболее часто встречающиеся накипеобразующие соединения

Название	Химическая формула	Основные параметры системы
Карбонат кальция (кальцит)	$\text{CaCO}_3$	Парциальное давление $\text{CO}_2$ , температура, общее содержание растворенных солей
Сульфат кальция Гипс (встречается наиболее часто)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Температура, общее солесодержание, давление
Ангидрит	$\text{CaSO}_4$	
Сульфат бария	$\text{BaSO}_4$	Температура, солесодержание
Сульфат стронция	$\text{SrSO}_4$	
Соединения железа		
Карбонат железа (II)	$\text{FeCO}_3$	Коррозия, растворенные газы, pH
Сульфид железа (II)	$\text{FeS}$	
Гидроксид железа (II)	$\text{Fe(OH)}_2$	
Гидроксид железа (III)	$\text{Fe(OH)}_3$	
Оксид железа (III)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	

Накипь, образованная неорганическими солями, может появиться во многих местах; перенасыщение может иметь место на стенке коллектора, когда добытая жидкость поступает в эксплуатационную насосно-компрессорную колонну; накипь может образоваться по всей длине эксплуатационной насосно-компрессорной колонны, на насосных штангах глубинных насосов и в забойных насосах; образование накипи возможно в наземных резервуарах и на поверхностях нагрева в подогревателе-сепараторе. В системе обработки воды накипь может появиться в насосах для нагнетания воды, в наземных трубопроводах, проложенных к нагнетательным скважинам и на поверхностях породы пласта, в который нагнетается вода.

В некоторых случаях накипь можно удалить при помощи химической обработки, что требует больших затрат времени и средств. Для удаления осадка сульфата бария, который невозможно удалить при помощи химикатов, может потребоваться замена наземных трубопроводов или ликвидация скважины.

### Карбонат кальция

Равновесное состояние карбоната кальция в воде нефтяных месторождений часто нарушается вследствие изменений температуры, давления и величины pH. Поскольку растворимость карбоната кальция при повышении температуры снижается, нагнетание воды с поверхности в теплую породу увеличивает возможность осаждения карбоната кальция. Его растворимость повышается по мере увеличения общего содержания. Например, при добавлении NaCl в количестве 200 000 мг/л растворимость  $\text{CaCO}_3$  повышается более чем на 100 %. Возможность прогнозирования осаждения карбоната кальция является предметом многих исследований. При помощи индекса насыщения Ланжелье была сделана попытка установить зависимость концентрации кальция и щелочности от величины pH, температуры и общего количества растворенных веществ. Но значение этого индекса для нефтепромысловых минерализованных пластовых вод ограничено.

В настоящее время для прогнозирования осаждения карбоната кальция в нефтепромысловых системах широко используется индекс Стиффа-Дэвиса. Для того чтобы данные анализа были достоверными, для анализа необходимо иметь свежие пробы; анализы, проведенные в лаборатории, не являются надежными, так как возможно существенное изменение характеристик воды. Индекс Стиффа-Дэвиса изменяется в пределах от -2,0 до +2,0. Положительные числа указывают на повышение степени перенасыщения; отрицательные числа - на то, что раствор превышает недостаточное насыщение. Надежность данных, полученных при помощи этого индекса, зависит от точности анализа.

### Сульфат кальция

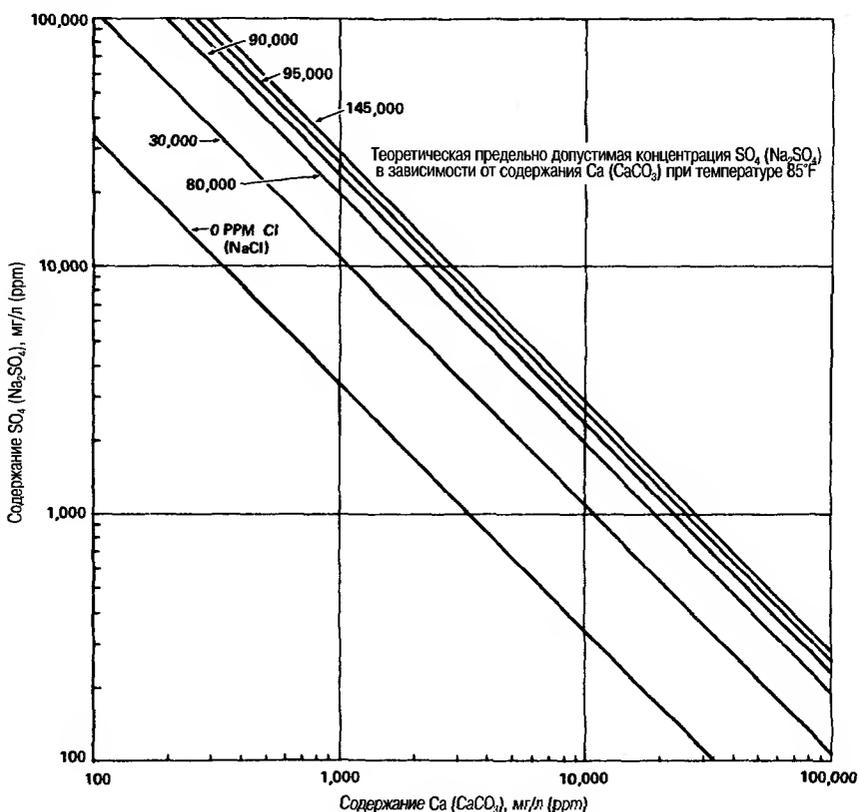
На месторождениях нефти наиболее часто обнаруживают отложения сульфата кальция в виде гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ); отложения гипса, в основном, образуются при температурах ниже 100°F (38°C); при более высоких температурах возможно образование отложений ангидрита ( $\text{CaSO}_4$ ). При повышении температуры примерно до 100°F растворимость гипса повышается, а при дальнейшем повышении температуры снижается. Присутствие хлорида натрия способствует повышению растворимости ангидрита, также как и карбоната кальция, до тех пор, пока концентрации соли не станет равной приблизительно 150 000 мг/л. При более высоких концентрациях соли растворимость сульфата кальция снижается. При добавлении NaCl в количестве 150 000 мг/л растворимость гипса повышается в три раза.

Одним из индексов, используемых для прогнозирования возможности образования отложений гипса, является индекс, рассчитанный совсем недавно Скиллмэном, МакДоналдсом и Стиффом. Причиной осаждения сульфата каль-

дия обычно является смешение воды из двух разных источников, причем вода одного из этих источников имеет высокую концентрацию кальция или сульфата. Графическая характеристика растворимости, показывающая зависимость концентрации кальция и сульфата от общей концентрации минерализованной пластовой воды, представлена на Рис. 43.19.

### Сульфат бария

Растворимость сульфата бария ниже, чем у других солей, обычно образующих отложения, и в дистиллированной воде равна приблизительно 2,3 мг/л. Растворимость сульфата бария также повышается при повышении концентрации солей. При добавлении в дистиллированную воду NaCl в количестве 100 000 мг/л растворимость сульфата бария повышается с 2,3 мг/л до приблизительно 30 мг/л при температуре 77°F (25°C).



Указания по применению данного графика:

1. Определить концентрацию Ca (в виде  $\text{CaCO}_3$ ),  $\text{SO}_4$  (в виде  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) и Cl (в виде NaCl).
2. Нанести на график точку пересечения значений концентраций Ca и  $\text{SO}_4$ .
3. Если точка находится выше диагонали, показывающей концентрацию NaCl, то при использовании воды будет иметь место тенденция к осаждению  $\text{CaSO}_4$ . Если точка находится ниже этой диагонали, то вода недостаточно насыщена и  $\text{CaSO}_4$  не будет выпадать в осадок.

Рис. 43.19 Графическая характеристика растворимости сульфата кальция при различных концентрациях в минерализованных пластовых водах.

Растворимость сульфата бария повышается при повышении температуры, поэтому одновременное действие двух влияющих факторов - температуры и концентрации хлорида натрия - может привести к повышению растворимости приблизительно до 65 мг/л при температуре 203°F (95°C).

Осаждение сульфата бария обычно происходит в результате смешения воды с высоким содержанием бария и воды с высокой концентрацией сульфата. Следует не допускать такого смешения, но если избежать этого невозможно, то для борьбы с отложениями можно применять химические ингибиторы.

### **Профилактика образования накипи**

Первыми ингибиторами образования накипи были неорганические полифосфаты, однако очень быстро вскрылись их недостатки: при температуре выше 140°F (60°C) они превращались в ортофосфаты, то же самое наблюдалось при кислотном pH или при продолжительном пребывании их в воде. Ортофосфаты не являются ингибиторами образования накипи. В настоящее время для профилактики образования накипи в нефтепромысловых системах применяют ингибиторы трех типов: (1) сложные эфиры полифосфорной кислоты, (2) фосфонаты и (3) органические полимеры, например, полимеры или сополимеры акриловой или метакриловой кислоты.

Сложные эфиры фосфорной кислоты можно добавлять в воду почти всех нефтяных месторождений. Фосфонаты и полимерные соединения имеют определенные преимущества при температуре воды выше 200°F (90°C). Дозировка зависит от температуры и концентрации взвешенных веществ, так как твердые вещества адсорбируют ингибитор, и, следовательно, для эффективного ингибирования требуется высокая концентрация ингибиторов. Кроме того, дозировка прямо пропорциональна степени перенасыщения.

При использовании ингибиторов образования накипи в добывающих скважинах часто применяется метод "нагнетание под давлением". Он заключается в нагнетании ингибитора образования накипи в продуктивный пласт через эксплуатационную насосно-компрессорную колонну под давлением. Молекулы ингибитора образования накипи адсорбируются породой и постепенно выделяются вместе с добытой жидкостью. Метод нагнетания ингибитора образования накипи под давлением можно применять не более, чем в течение 6 месяцев. Необходимость повторной обработки определяется при помощи анализов добытой жидкости на остаточное содержание ингибитора.

### **КОРРОЗИЯ**

Самыми агрессивными веществами в системах воды нефтяных месторождений являются диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), сероводород (H<sub>2</sub>S) и кислород (O<sub>2</sub>).

Одной из причин коррозионной активности кислорода, даже при низких концентрациях, является его участие в создании элементов дифференциальной коррозии под отложениями на металлических поверхностях, которые становятся анодными по отношению к прилегающим участкам, где нет отложений. Борьба с коррозией под действием кислорода в системах воды нефтяных месторождений требует принятия всех возможных мер, во избежание проникновения воздуха в любые наземные резервуары и аппараты, а также в обсадные колонны добывающих скважин. Где возможно, для постоянного поддержания газовой подушки на этих участках используется попутный газ.

После определения необходимости борьбы с воздействием кислорода обычно применяют поглотитель растворенного в воде кислорода, который вступает в реакцию с кислородом, присутствующим в следовых количествах. Используются различные сульфиты, в том числе, бисульфит натрия (NaHSO<sub>3</sub>), бисульфит аммония (NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub>), сульфит натрия (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) и диоксид серы (SO<sub>2</sub>).

## ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Химизм реакции со всеми этими веществами один и тот же: сульфит реагирует с кислородом с образованием иона сульфата.



Реакция между сульфитом и кислородом зависит от температуры и величины рН. Оптимальная величина рН для быстрого протекания реакции  $\approx 7$ . Величина рН воды нефтяных месторождений, как правило, изменяется в пределах 6,0 - 7,5.

Для ускорения этой реакции требуется катализатор. Иногда эту функцию выполняют присутствующие в пластовой воде ионы металлов, но обычно катализатор добавляют при составлении рецептуры сульфита.

В системах, где используется пресная вода с высоким содержанием кислорода, возможен вариант, альтернативный поглощению кислорода, а именно, применение пассивирующих ингибиторов, например, хромата в сочетании с добавками цинка и фосфата. Однако из-за присутствия в системах нагнетания  $\text{H}_2\text{S}$  или некоторых легко окисляющихся углеводородов происходит восстановление хромата и осаждение цинка, поэтому эти варианты редко применяются при заводнении.

Сероводород отличается коррозионной активностью, так как он ионизируется с образованием слабой кислоты:



В присутствии  $\text{H}_2\text{S}$  происходит осаждение сульфида железа. Эти отложения являются катодными по отношению к основному металлу, поэтому под отложениями сульфида железа обычно развивается сильная точечная коррозия; причина всех этих явлений - присутствие  $\text{H}_2\text{S}$ . Если в отложения сульфида проникает кислород, то скорость коррозии может стать неуправляемой. Смесь  $\text{H}_2\text{S}$  и углекислого газа также отличается гораздо большей агрессивностью, чем каждый из этих газов отдельно. В случае присутствия  $\text{H}_2\text{S}$  для предотвращения сильной локальной коррозии следует применять эффективный, пленкообразующий ингибитор.

Ингибиторы коррозии, применяемые при использовании воды нефтяных месторождений, всегда являются органическими пленкообразующими веществами. Их молекулы адсорбируются на поверхностях металла, защищая металл от агрессивных веществ. Поскольку пленкообразующие ингибиторы коррозии добавляют в минерализованные пластовые воды самой разной концентрации и очень часто в смесь воды и углеводородов, необходимо использовать ингибиторы с различными коэффициентами растворимости. При эксплуатации скважин, где смесь сырой нефти и минерализованной пластовой воды должна подвергаться обработке, часто требуется ингибитор, растворимый в нефти и лишь слегка диспергируемый в воде. Такой ингибитор образует на поверхности металла пленку, защищающую металл от воздействия нефтяной фазы и обеспечивающую стойкость металла в течение длительного периода времени; это означает, что пленка сохраняется даже при перерывах в подаче ингибитора. Благодаря этому часто допускается периодическая обработка добывающих скважин. Один из наиболее распространенных методов обработки добывающих скважин заключается в использовании специальной установки для нагнетания насосом ингибитора в насосно-компрессорную колонну или в межтрубное пространство с последующей дополнительной промывкой пластовой водой. Периодичность такой обработки зависит от агрессивности веществ, обладающих коррозионной активностью.

В системах нагнетания воды, где преобладает водная фаза, ингибиторы должны быть либо полностью растворимыми в воде, либо отличаться хорошей диспергируемостью в воде, чтобы они могли проходить по наземным трубо-

проводам в насосно-компрессорную колонну. Эти ингибиторы не являются стойкими, и поэтому их следует подавать непрерывно, обеспечивая их постоянное остаточное содержание в системе. Отсутствие остаточного содержания ингибитора приводит к десорбции пленки ингибитора и к потере защиты.

При мониторинге программы применения химикатов остаточное содержание ингибиторов более точно определяют путем анализов методом экстракции в полевых условиях.

При мониторинге коррозии обычно одновременно используют металлические купоны потери веса, приборы для измерения коррозии, катушки трубопроводов или ниппели (их преимущество заключается в том, что они имитируют параметры потока) и "счетчики железа". В системах, где отсутствует сероводород, имеется остаточная концентрация железа. В присутствии сероводорода железо осаждается в виде сульфида железа.

## **БОРЬБА С БАКТЕРИЯМИ**

---

При использовании воды нефтяных месторождений большое значение имеет борьба с бактериями, так как они могут вызвать закупоривание трещин и пор пласта, в который нагнетается вода, или сильную коррозию.

Наибольшую опасность из всех микроорганизмов представляют анаэробные сульфатовосстанавливающие бактерии, *Desulfovibrio desulfuricans*. Присутствуя во многих нефтеносных пластах, они участвуют в химических реакциях, протекающих в процессе образования нефти. Они восстанавливают неорганические сульфаты ( $SO_4^{2-}$ ) до сульфидов ( $S^{2-}$ ), что приводит к осаждению сульфида железа.

Анаэробные сульфатовосстанавливающие бактерии другого вида, *Clostridia*, встречаются не так часто, как *Desulfovibrio*. Известно, что эти микроорганизмы являются термофильными и предпочитают температуру в пределах 55 - 70 °С.

Следует вести борьбу и с некоторыми видами аэробных бактерий, большинство из которых обнаруживается в поверхностных водах, добавляемых при заводнении к пластовой воде. Среди этих микроорганизмов наиболее важными являются *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Aerobacter*, *Escherichia* и *Bacillus*. Они образуют иловые массы, которые могут привести к закупориванию или же обеспечивают защиту анаэробных бактерий *Desulfovibrio*.

Иногда в воде, используемой для заводнения, обнаруживают железобактерии; два основных вида этих бактерий – *Sphaerotilus* и *Gallionella*. Они окисляют ион двухвалентного железа ( $Fe^{2+}$ ) с образованием иона трехвалентного железа ( $Fe^{3+}$ ). Железобактерии можно обнаружить при помощи анализа под микроскопом после окрашивания.

Бактерии *Beggiatoa* окисляют сульфид с образованием сульфата. *Beggiatoa* обычно размножаются в открытых системах пластовой воды, где сброс воды из нефтепромыслового магистрального трубопровода осуществляется в открытый резервуар. Эти бактерии часто становятся причиной забивки фильтров.

Для борьбы с микроорганизмами применяются химические вещества. Концентрации химических веществ и продолжительность контакта зависят от типа системы. Химикаты обычно вводят определенными дозами, например, 50 - 100 мг/л, в течение 4 - 8 часов. После добавления химикатов из системы отбирают пробы и определяют популяцию микроорганизмов. При помощи таких анализов определяют частоту применения биоцидов.

Во многих случаях для эффективной борьбы с микроорганизмами необходима физическая очистка систем. Углубления в трубопроводах или емкостях, где образуются скопления донных осадков и загрязнений, препятствуют контакту бактерий с химикатами. В таких случаях в дополнение к программе химической обработки следует проводить тщательную "домашнюю уборку".

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

---

American Petroleum Institute: *Primer of Oil and Gas Production*, 1983.

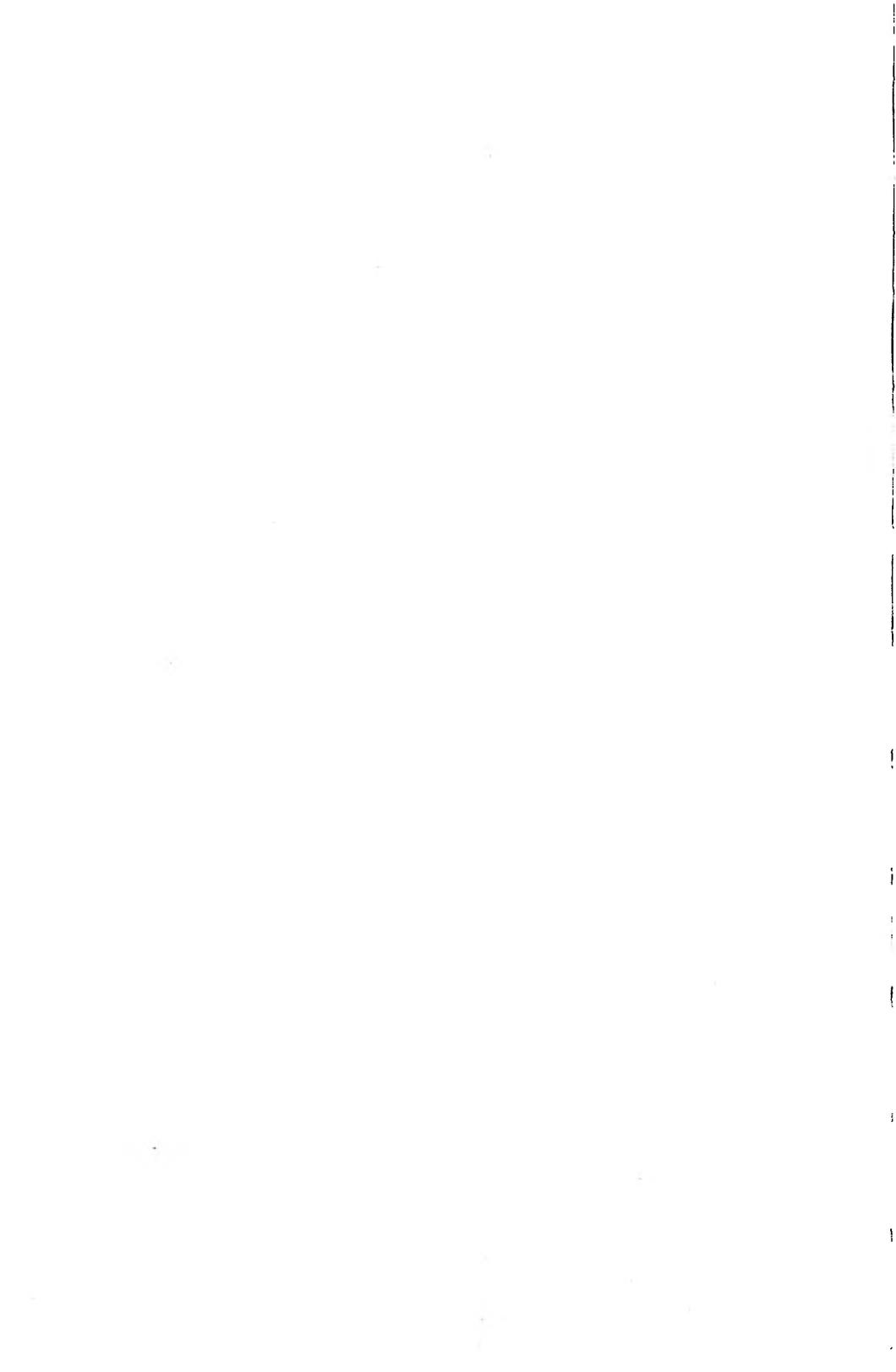
American Petroleum Institute: *Treating Oil Field Emulsions*, 3d ed., 1974.

Cole, Frank W.: *Reservoir Engineering Manual*, Gulf, Houston, 1969.

Collins, A. Gene: *Geochemistry of Oilfield Waters*, Elsevier, Amsterdam, 1975.

Levorsen, A. I.: *Geology of Petroleum*, Freeman, San Francisco, 1966.

Uren, L. C.: *Petroleum Production Engineering*, McGraw-Hill, New York



---

## ГЛАВА 44

---

# ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ВЫСШЕЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ

---

На протяжении многих веков предыдущие поколения пришли к выводу о том, что среда, окружающая человека на предприятии, почти повсеместно загрязнена невидимыми частицами. Мелкий мусор и отходы окружают человека в процессе любой его промышленной деятельности и проникают в чувствительные приборы и системы управления, ухудшая их эксплуатационные качества и вызывая сомнение в надежности полученных при помощи приборов данных, а иногда приводят к нарушению таких важных процессов, как регулирование расхода ракетного топлива, когда отказ клапана, регулирующего подачу топлива может стать причиной аварийного прекращения полета космического корабля или разрушения летательного аппарата в полете. В авиакосмической промышленности были разработаны технологии очистки воздуха в помещениях при помощи оборудования, обеспечивающего постоянную циркуляцию воздуха и удаление из него мелких частиц путем фильтрации, а также правила поведения персонала, предусматривающие использование специальной одежды во избежание загрязнения производственных помещений. Научные исследования и разработки в этой области продолжают и в настоящее время. Проведенные недавно исследования показали, что люди являются источником постоянного выделения в окружающую среду посторонних частиц, и некоторые новейшие технологии производства, особенно в области электроники, не допускают такого загрязнения и поэтому требуют применения роботов для выполнения некоторых очень важных технологических операций.

Поэтому не вызывает удивления тот факт, что гидрохимии уделяют особое внимание аналогичной проблеме - присутствию твердых частиц в воде. При выполнении технологических операций, требующих высокой точности, таких, например, как приготовление фармацевтических препаратов, промывка электронно-лучевых трубок, печатных схем и транзисторов, а также в качестве подпиточной воды для ядерных энергетических установок должна использоваться вода высшей степени очистки. Концентрация ионных примесей может быть снижена до очень низких значений, измеряемых числом частей на миллиард (микрограммы на литр), поэтому становится практически невозможно путем измерения определить различия в электропроводности. Но в то же время в воде могут оставаться примеси в виде твердых частиц, не обнаруживаемые работающими в оперативном режиме аналитическими приборами; это может привести к повреждению изделий при промывке их такой водой. Например, исследование линии шириной менее 1 мкм на интегральной схеме с транзисторами показывает, что осаждение частиц даже субмикронного размера на поверхности интегральной схемы во время ее промывки может привести к разрушению всей схемы, поэтому необходима заключительная фильтрация воды через субмикронные фильтры. В ядерной энергетике присутствие органических кислот в парогенераторах, для обработки которых используются лишь несколько полностью летучих химических веществ по выбору, показало необходимость более полного удаления из подпиточной воды образующих эти кислоты органических веществ, чем предполагалось на ранних этапах эксплуатации этих небезо-

пасных установок. Источником таких органических веществ может быть не только неочищенная вода, но и ионообменные смолы, регенерационные растворы и метаболиты микробов, скопления которых могут находиться в разных частях системы.

Определение характеристик воды высшей степени очистки для использования в различных отраслях промышленности, осложняется тем, что промышленные объединения не успевают реагировать на быстрые изменения, происходящие в их отраслях промышленности. Например, стандарты качества воды, используемой для проведения химических реакций, разработанные Американским обществом по испытанию материалов (ASTM) (в настоящее время действителен стандарт ASTM D 1193-77), признаны неприемлемыми для электронной промышленности и в новом стандарте будут указаны четыре степени очистки воды, используемой в электронной промышленности. Новый стандарт представляет интерес в том плане, что (1) определяемые путем анализов предельно допустимые концентрации указаны отдельно для воды каждой из четырех степеней очистки и (2) указаны типовые химико-технологические операции, необходимые для получения воды такого качества.

В качестве примера в Табл. 44.1 приведены предельные показатели некоторых химических свойств воды: удельное сопротивление изменяется от 0,5 МОм для воды низшей степени очистки E-IV до 18 МОм для воды высшей степени очистки E-I при условии получения воды такого качества в течение 90 % времени работы системы водоподготовки. В обязанности инженеров-технологов входит определение предельных показателей по своему усмотрению, исходя из характера конкретных производственных процессов. Аналогичным образом, для получения воды низшей степени очистки (E-IV) достаточно провести обработку воды в секции первичной очистки, на установке для деминерализации - путем ионного обмена, обратного осмоса или дистилляции - и на фильтрах предварительной очистки, выбор которых осуществляется в зависимости от качества воды до обработки и заданных характеристик воды низшей степени очистки E-IV. Воду более высокой степени очистки E-III - E-I, удовлетворяющую более жестким требованиям к качеству, получают в секциях вторичной и третичной очистки.

**Таблица 44.1** Некоторые стандарты качества воды, используемой в электронной промышленности, рекомендуемые ASTM

Измеряемые параметры	Тип E-I	Тип E-II	Тип E-III	Тип E-IV
Сопротивление, мин. МО м-см при 25 °С	18 (90% времени) минимум 17	15(90% времени) , минимум 12	2	0,5
Количество частиц*, макс. на мл	2	2	100	500
Жизнеспособные бактерии, макс. на мл	< 1	10	50	100
Общее содержание органического углерода (TOC), макс. ppb	50	200	1000	5000
Общее количество твердых веществ, макс. ppb	10	50	500	2000
Na, макс. ppb	< 1	10	200	1000
Cl, макс. ppb	2	10	100	1000

\* Частицы размером более 1 мкм.  
ppb - число частей на миллиард

В Табл. 44.2 указаны действующие стандарты USP XX (USP - Фармакопея США). В этом случае тоже указаны технологии получения чистой воды. Вторая группа стандартов, предложенная на Форуме предприятий, относящихся к

## ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ВЫСШЕЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ

Фармакопее США, включает директивы (также указанные в Табл. 44.2), основанные на предположении, что для обеспечения требуемой микробиологической чистоты недостаточно руководствоваться только стандартами на оборудование.

**Таблица 44.2** Характеристики, указанные в стандартах USP-XX

Измеряемые параметры растворов для инъекций	Очищенная вода	Вода для приготовления
pH (с KCl)	5,0 - 7,0	5,0 - 7,0
Ca и тяжелые металлы	При анализе не определяются*	При анализе не определяются*
Сульфат, хлорид, CO <sub>2</sub>	При анализе не определяются*	При анализе не определяются*
Окисляемые вещества, макс. ppm	0,3	0,3
Общее количество твердых веществ, макс. ppm	10	10
Пирогенность	Не указывается	При анализе не определяется*
Микробиологическая чистота	Дистилляция, обратный осмос, ионный обмен и др.	Дистилляция, обратный осмос
Аэробные организмы†, колониеобразующих единиц на мл	100	50

\* Методы анализа не указываются.

† Измерение этого параметра стандартами USP не предусмотрено, но такое предложение поступило на Форуме.

Кроме этих стандартов, разработанных промышленными объединениями, выпуск стандартов качества воды, используемой для производства пищевых продуктов и лекарств, находится в компетенции Управления по качеству пищевых продуктов и лекарственных веществ (FDA) и Управления охраны окружающей среды (EPA). Например, FDA утверждены так называемые "хорошие технологии" (GMP), которые должны применяться при производстве, обработке, упаковке и хранении парентеральных веществ, производимых фармацевтической промышленностью. Ниже указаны три важных требования, которые следует выполнять при производстве парентеральных веществ и которые не предъявляют другие организации по стандартизации:

1. Популяции микроорганизмов. Количество популяций микроорганизмов в воде, используемой для промывки и ополаскивания тары для лекарственных препаратов и укупорочных средств, не должно превышать 50 на 100 мл воды, а в воде, используемой при производстве лекарств - 10 на 100 мл; выполнение этих норм подтверждается данными, полученными путем последовательного отбора трех проб в одном и том же месте и их анализа.
2. Температура хранения. Если появляется необходимость в хранении используемой в процессе производства воды в течение более 24 часов, то ее следует хранить при температуре не ниже 80°C. Если продолжительность хранения воды не превышает 24 часов, то допускается хранение при температуре окружающей среды, но через каждые 24 часа воду из емкости для хранения следует полностью сливать. Очевидно, что эти технические условия в значительной степени влияют на выбор систем испарения (глава 18) для получения такой воды, так как в компрессионных выпарных аппаратах воду получают при температуре, немного превышающей температуру окружающей среды, тогда как многокорпусные испарители могут быть рассчитаны на получение воды при температуре выше 80°C.

3. Фильтры. Ни на одном участке системы трубопроводов для воды, используемой для производства или окончательной промывки, не допускается применение фильтров. Такое требование трудно объяснить, так как не дано определение понятия "фильтр". Установлено, что некоторые типы патронных фильтров со сменными фильтрующими элементами не являются надежными в эксплуатации и фактически могут пропускать загрязнения, однако в таких системах часто используются ультрафильтры.

Управление охраны окружающей среды США (EPA) принимает участие в разработке стандартов качества очистки воды, так как его задача заключается в том, чтобы не допустить присутствия галогенсодержащих органических веществ, в первую очередь, тригалометанов, в питьевой воде и, следовательно, в пищевых продуктах и лекарственных препаратах, для производства которых используется чистая вода.

Эти примеры показывают, что всем потребителям воды высшей степени очистки должны быть хорошо известны не только требования стандартов качества воды, что необходимо им для производства продукции хорошего качества, но и сфера полномочий государственных нормативных организаций при осуществлении контроля технологии производства и качества продукции.

При монтаже системы, состоящей из ряда технологических установок, которые в совокупности должны обеспечить получение воды высшей степени очистки, соответствующей установленным требованиям, перед гидрохимиком встает задача выбора оборудования, обеспечивающего снижение содержания каждого из нижеуказанных видов веществ:

1. Растворимые вещества - минералы, органические вещества, газы
2. Твердые частицы \*, фильтрующиеся при помощи мембранных фильтров 0,22 мкм
3. Вещества в коллоидном состоянии\* (грубодисперсные примеси) с размером частиц менее 0,22 мкм, обычно SiO<sub>2</sub> и оксиды тяжелых металлов
4. Биологические вещества - микробы, вирусы, метаболиты.

---

\*Что касается этих видов веществ, то потребители воды высшей степени очистки пересмотрели устаревшие нормы, в которых граница между твердыми частицами и грубодисперсными примесями определялась размером частиц 0,45 мкм

Типовые химико-технологические операции, обеспечивающие удаление загрязняющих примесей, представлены в предыдущих главах настоящей "Книги о воде", а на данном этапе важно осознать, что для выбора оптимальной системы технологических установок необходимо знать, какая связь существует между технологическими установками и их функциями в процессе уменьшения содержания загрязняющих примесей. Например, в некоторых случаях мембранный фильтр (ультрафильтрация, обратный осмос или электродиализ) лучше установить до ионообменного устройства для снижения ионной нагрузки или защиты ионообменника от загрязнения органическими веществами, а иногда - после ионообменного устройства (для удаления органических веществ, попадающих в воду вследствие старения ионообменных смол, или для фильтрации остатков микроорганизмов, которые могут выделяться из ионообменных слоев).

Другой фактор, который следует принимать во внимание при разработке технологической схемы, - влияние объемной скорости потока на качество воды. Это влияние усиливается еще по двум причинам: во-первых, не допускается работа ионообменных устройств при нулевой или низкой скорости потока (менее примерно 20 % от расчетной пропускной способности) и, во-вторых, материалы, используемые для изготовления системы сбора и распределения воды, при низкой скорости потока могут стать причиной загрязнения воды вследствие выщелачивания или выделения входящих в состав пластмасс органических веществ, или коррозии металлических сплавов. Краткий перечень материалов,

## ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ВЫСШЕЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ

допустимых к применению в системах получения воды высшей степени очистки, приведен в Табл. 44.3. Во многих системах получения воды высшей степени очистки предусмотрена возможность повторения цикла, благодаря чему улучшение качества воды по этим двум возможным причинам ее загрязнения, связанном со скоростью потока, становится минимальным. В Табл. 44.4 приведен перечень типовых химико-технологических операций при обработке воды и их эффективность в системе получения воды высшей степени очистки.

**Таблица 44.3** Конструкционные материалы, рекомендуемые для изготовления системы сбора и распределения воды высшей степени очистки (указаны в порядке предпочтения)

Тefлон (тетрафторэтилен)	Полипропилен
Тefзел (трифтормоноэтилэтилен)	Боросиликатное стекло
Тантал	Нержавеющая сталь 304 L
Титан	Нержавеющая сталь 304
Чистое олово в слитках	Нержавеющая сталь 316 L
Особо чистое кварцевое стекло	Нержавеющая сталь 316
ПВДФ (поливинилиденфторид)	Нержавеющая сталь 321
Полизитлен	ПВХ (поливинилхлорид)

*Источник: V.C. Smith, Vapronics, Inc.*

**Таблица 44.4** Эффективность типовых химико-технологических операций при обработке воды в системе получения воды высшей степени очистки\*

Технологические установки (со ссылкой на главу в книге)	Растворимые вещества		Твердые частицы	Грубодисперсные примеси	Биологические вещества	
	Ионные	Органические	Газ	< 45 мкм>	0,45 мкм	Живые клетки или остатки клеток
Разделение твердой и жидкой фаз (Главы 8 и 9)	0	1	0	2	2	1†
Осаждение (Глава 10)	1	1	0	1	1	1
Ионный обмен (Глава 12)						
Умягчение	0	0	0	1	0	0
Деминерализация	2	1	0	1	0	0
Обеззараживание (Глава 22)						
С применением химикатов	0	0	0	0	0	2-3†
При помощи ультрафиолетового излучения	0	2	0	0	0	2-3†
Мембранное разделение (Глава 15)						
Ультрафильтрация	0	1	0	3	2	2
Обратный осмос	2	2	0	3	2	2-3
Дегазация (Глава 14)	0	0	1-3	0	0	0
Дистилляция (Глава 18)	2-3	2-3	2-3	2-3	3	3
Адсорбция (Глава 17)	0	1	0	1-2	0	0-1

\* Условные обозначения: 0 - не удаляются; 1 - частичное удаление; 2 - удаление до низких концентраций; 3 - удаление до концентраций, не определяемых современными методами анализа.

† Возможно уничтожение живых организмов, но биомасса может оставаться.

Примечание: Если на отдельных технологических установках возможно уменьшение содержания загрязняющих примесей до уровня 2, то при последовательном соединении тех же установок на одной линии можно снизить содержание загрязняющих примесей до уровня 3

На Рис. 44.1 в качестве примера представлена схема системы получения воды высшей степени очистки, которая применяется в микроэлектронной промыш-

шенности. Ниже указано назначение каждой из технологических установок, показанных на этой схеме.

1. Отстойник. Отстойник необходим в тех случаях, когда источником воды являются поверхностные воды, содержащие взвешенные вещества. Для удаления этих твердых веществ в отстойник можно добавлять коагулянты и флокулянты, а для обеззараживания - хлор (см. главы 8 и 9). Если вода жесткая (жесткость обычно превышает 100 мг/л), в отстойнике можно проводить обработку известью для частичного умягчения (глава 10) и частичной деминерализации воды, поступающей из водного источника. В результате такой обработки получают воду с высоким значением pH, что облегчает обеззараживание воды и удаление из нее тяжелых металлов. Если источником воды служит городская распределительная система, то отстойник, как таковой, не требуется, но его можно заменить установкой для цеолитового умягчения (глава 12) в целях защиты от загрязнения устройства обратного осмоса, расположенного на этой линии далее в направлении потока, так как его работу, как правило, регулируют для сброса соленой воды с отрицательным индексом Ланжелье.
2. Фильтр глубинного типа (см. главу 9). Этот фильтр используется для доочистки воды, выходящей из отстойника и с установки для умягчения известью, и обеспечивает уменьшение мутности до  $< 0,1$  нефелометрических единиц мутности. При помощи этого фильтра удаляют микробы многих типов; возможно даже удаление вирусов, если при флокуляции они образуют фильтруемую массу. Если в начале линии имеется установка для цеолитового умягчения, то такой фильтр не требуется.

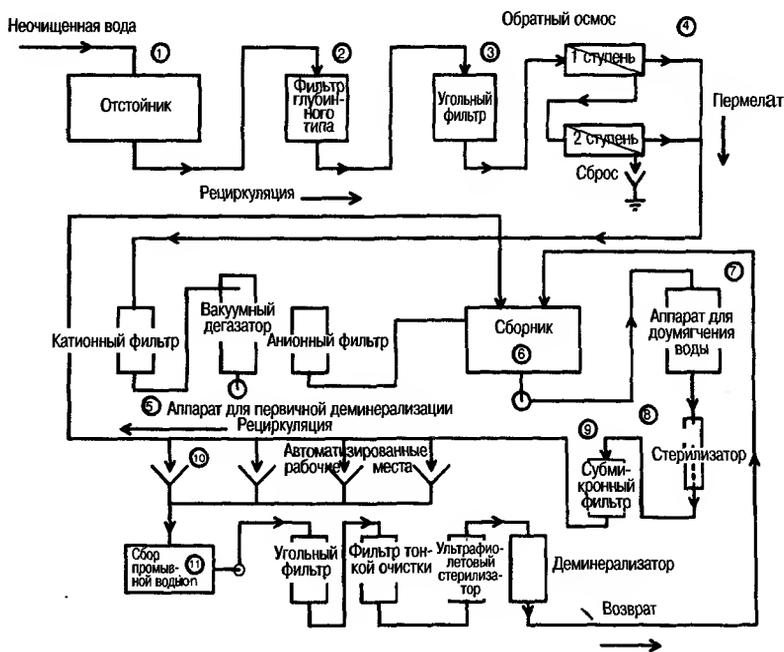


Рис. 44.1 Схема системы получения воды высшей степени очистки, используемой в качестве промывной воды в производстве микропроцессоров. Качество промывной воды после использования обычно настолько хорошее, что ее можно использовать для частичной повторной обработки

## ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ВЫСШЕЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ

3. Угольный фильтр (см. главу 17). Этот фильтр выполняет две функции: он удаляет остаточный хлор путем прямого восстановления, защищая, таким образом, ионообменные смолы, находящиеся далее по линии и адсорбирует некоторые неполярные органические вещества, содержащиеся в неочищенной воде. Благодаря этому снижается содержание растворенных веществ, а также обеспечивается защита установленных далее на линии анионообменников от загрязнения органическими веществами. Если сначала при помощи сульфита разрушить хлор, то этот фильтр можно заменить полимерной ловушкой для органических примесей. Вследствие удаления хлора мембраны обратного осмоса (RO) становятся чувствительными к биологическому агрессивному воздействию, поэтому может появиться необходимость в стерилизации угольного фильтра ультрафиолетовым излучением. Безусловно, следует часто проводить очистку мембраны.
4. Мембранное разделение (см. главу 15). Этот процесс может осуществляться при помощи устройства обратного осмоса (RO), которое обеспечивает (а) уменьшение содержания растворенных ионов, (б) уменьшение содержания растворенных органических веществ и (в) фильтрацию грубодисперсных примесей, микроорганизмов и их остатков. Преимущества этой технологии заключаются в том, что, во-первых, уменьшение содержания растворенных ионов существенно снижает ионную нагрузку на ионообменные фильтры, установленные на линии далее в направлении потока; во-вторых, благодаря уменьшению содержания органических веществ повышается качество воды на выходе и, в то же время, обеспечивается защита находящихся далее на линии ионообменников от загрязнения органическими веществами. В-третьих, фильтрация биологических веществ обеспечивает защиту установленного далее на линии оборудования от прямого агрессивного воздействия микроорганизмов или от превращения в инкубатор микроорганизмов; кроме того, в процессе фильтрации удаляются более крупные фракции присутствующего в коллоидном состоянии диоксида кремния. Вместо устройства обратного осмоса можно использовать мембранный ультрафильтр, который имеет те же преимущества, за исключением уменьшения содержания ионов, при снижении энергозатрат на эксплуатацию и потерь воды в результате ее отвода.
5. Аппарат для первичной деминерализации. Этот аппарат обычно представляет собой ионообменный фильтр, имеющий два ионообменных слоя (см. главу 12), в первую очередь, в том случае, если мембранный фильтр оснащен обратноосмотическими мембранами. Однако, для этой цели можно использовать и выпарной аппарат, который обеспечивает удаление органических веществ, обеззараживание и дегазацию, эффективно работает на линиях воды, поступающей на очистку после обработки путем обратного осмоса, и успешно применяется при низких концентрациях растворенных газов.
6. Сборный танк. Этот аппарат предусмотрен для того, чтобы обеспечить возможность непрерывной рециркуляции воды при минимальном выщелачивании и потере качества воды. Он должен иметь устройство для защиты парового пространства для создания азотной "подушки" или и то и другое одновременно. Эти устройства фактически тоже являются своего рода технологическими установками, предназначенными для защиты от потери качества воды вследствие попадания загрязнений из воздуха и, в первую очередь, микробов, в процессе дыхания сборного танка. В таком сборном танке могут быть предусмотрены источники ультрафиолетового излучения для стерилизации.
7. Аппарат для доумягчения воды. Обычно для этой цели используется фильтр со смешанным ионообменным слоем, но это может быть и устройство для обратного осмоса или выпарной аппарат. На некоторых установках применяются регенерируемые аппараты для доумягчения воды, содержащие ио-

нообменные смолы, прошедшие специальную обработку; такие смолы используются в ядерной промышленности.

8. Ультрафиолетовый стерилизатор. Облучение ультрафиолетовыми лучами с длиной волны 254 нм проводится для окончательного уничтожения, без применения химической обработки, любых микробов, которые могли попасть в систему после подачи воды из сборного танка и выжить на более ранних стадиях обработки. Для проектировщиков и операторов систем получения воды высшей степени очистки устойчивость микробных загрязнений при последовательном прохождении через физические барьеры является общепризнанным фактом. Применение обычных химических биоцидов (например, хлора), очевидно, должно быть исключено, так как они являются источником загрязнения. Поскольку под действием ультрафиолетового излучения происходит окисление органических веществ с образованием углекислого газа, который будет уменьшать электрическое удельное сопротивление, такой стерилизатор нельзя постоянно использовать в том месте, где вода сильно загрязнена органическими веществами.
9. Субмикронный фильтр. Этот фильтр служит для удаления остаточных загрязнений, таких как фрагменты бактериальных клеток, перед использованием воды по назначению.
10. Место, где вода используется по назначению. На каждом рабочем месте перед использованием по назначению воду часто сначала пропускают через деминерализатор со смешанным слоем, с фильтрующими элементами патронного типа одноразового использования, содержащими ионообменную смолу, прошедшую специальную обработку (такая смола применяется в ядерной промышленности), а потом - через субмикронные фильтры. Поскольку вода после ее использования для промывки часто является достаточно чистой, ее возвращают на повторную обработку и снова направляют в основной сборник. В нем может быть установлено специальное устройство для ультрафиолетового облучения при длине волны 185 нм с целью окисления органических веществ.

На Рис. 44.2 показана система такого типа для получения воды высшей степени очистки, используемой при производстве электронной аппаратуры; пропускная способность системы - 100 галлонов/мин.

Вторым примером может служить технологическая схема системы получения пирогенной (лишенной неорганических примесей) воды, соответствующей стандарту качества USP (Фармакопея США) XX и используемой в производстве медицинских устройств для имплантации (Рис. 44.3). Эта система - менее сложная, так как требования к качеству воды в отношении удельного сопротивления не такие жесткие, как в большинстве случаев при использовании воды в электронной промышленности. Ниже приведен перечень оборудования этой системы.

1. Цеолитовый умягчитель. Эта установка имеет обводной трубопровод, который служит для корректировки конечного индекса стабильности в целях предотвращения образования отложений в последовательно соединенных с ней устройствах для обратного осмоса. В этой системе проводится очистка воды, используемой для снабжения населенных мест; при поступлении воды из другого источника, например, артезианской воды или поверхностных вод, потребуется дополнительная предварительная очистка.
2. Патронные фильтры. Эти фильтры установлены на одной линии и последовательно соединены, первый рассчитан на 50 мкм, второй - на 10 мкм.
3. Ультрафиолетовый стерилизатор. Чистый фильтр легко стерилизуется для защиты последовательно подключенных установок от действия микробов и уменьшения потока или снижения качества воды.

## ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЫ ВЫСШЕЙ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ

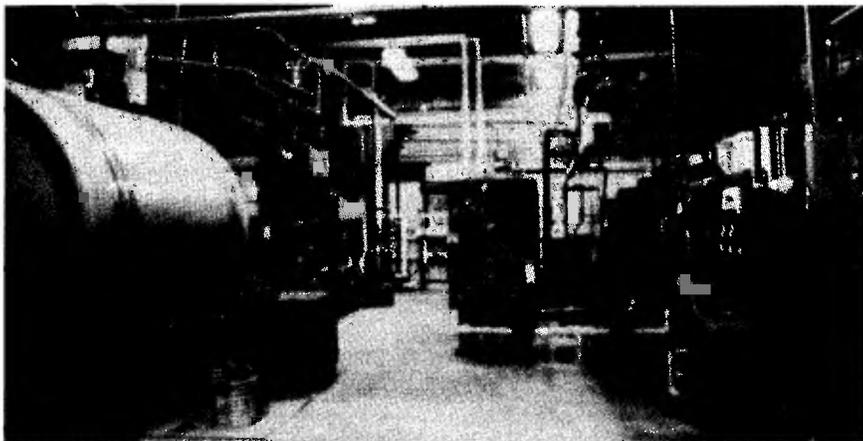


Рис. 44.2 Система получения воды высшей степени очистки, с пропускной способностью 100 галлонов/мин, в которую входит следующее оборудование: натрий-цеолитовый умягчитель (на заднем плане в центре), глубинный фильтр, фильтр с активированным углем, обратный осмос (справа), сборный танк с устройством защиты для дыхательного клапана (слева), конечный контур с ультрафиолетовыми стерилизаторами и аппаратами со смешанным ионообменным слоем для доумягчения воды, а также субмикронные фильтры на каждом рабочем месте (Публикация с разрешения Culligan USA.)

4. Устройство для двухступенчатого обратного осмоса на стадии получения готового продукта. Это устройство обеспечивает снижение содержания ионных веществ более, чем на 98 %, таким образом, общее количество растворенных веществ в воде после очистки уменьшается с 500 мг/л до менее 10 мг/л, что соответствует требованиям стандарта USP (Фармакопея США) XX. Кроме того, это устройство служит для удаления органических веществ с молекулярным весом более 300 и из него выходит стерильная вода.
5. Сборный танк. При хранении продукта в сборном танке обеспечивается защита парового пространства при помощи фильтра для очистки воздуха во избежание попадания загрязнений из воздуха при изменении уровня и дыхании резервуара.
6. Рециркуляция и заключительная фильтрация. Очищенная вода непрерывно рециркулирует через абсолютный фильтр 0,2 мкм к разным рабочим местам. Следует помнить, что фильтр этого типа может быть запрещен к применению в производстве парентеральных веществ правилами GMP Управления по качеству пищевых продуктов и лекарственных веществ (FDA), так что возможность его использования в этой технологической операции в будущем вызывает сомнения.

На Рис. 44.4 в качестве последнего примера представлена схема системы получения воды высшей степени очистки, в которой главным устройством для очистки воды является выпарной аппарат. Одно из преимуществ такой системы заключается в том, что продукт не содержит газов, поэтому при нагревании воды для использования ее по назначению не происходит образование пузырьков. Если поступающая из водного источника вода насыщена воздухом и при нагревании или прохождении через дроссельный клапан с большим перепадом давления велика вероятность выделения пузырьков, то для выполнения той же задачи в системах получения воды высшей степени очистки может потребоваться устройство для деаэрации.

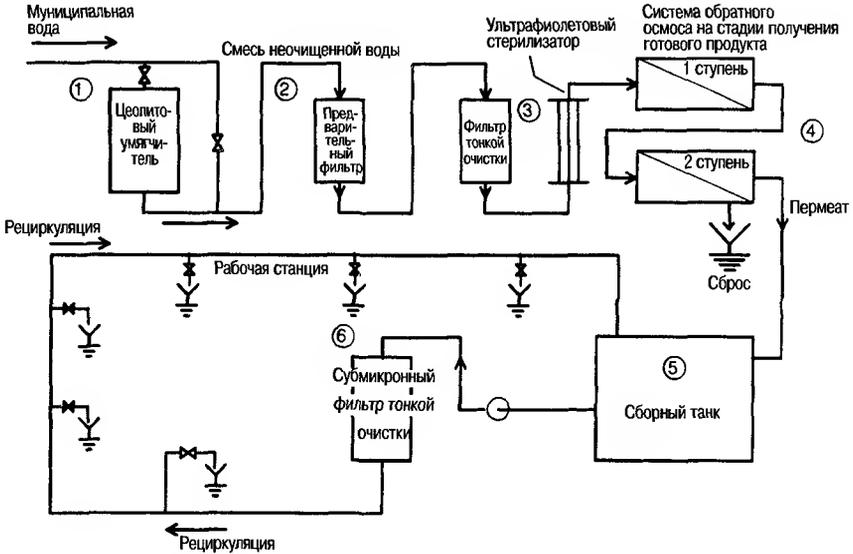


Рис. 44.3 Система получения пирогенной воды, соответствующей стандарту качества воды USP (Фармакопея США) XX для промывки медицинских устройств для имплантации.

1. В качестве основного источника воды требуется водяной пар. В большинстве случаев в системах предусмотрена обработка пара в целях борьбы с коррозией, поэтому все добавки из него должны быть удалены.
2. При пуске в выпарной аппарат подают деионизованную питательную воду. После пуска пар из отпарной секции и змеевика выпарного аппарата конденсируется для получения питательной воды.
3. Охлажденный конденсат пропускают через катионитный фильтр для удаления основных антикоррозионных добавок, морфолина или циклогексиламина.
4. Очищенная от катионов вода проходит доочистку в деионизаторе со смешанным слоем.
5. Органические вещества, в том числе, продукты разложения смолы, удаляются при помощи активированного угля или полимерной ловушки для органических веществ.
6. Отводимые сверху пары конденсируют и конденсат подвергают отпарке для удаления неконденсирующихся газов и летучих органических веществ.
7. После отпарки конденсат охлаждают для использования в технологическом процессе.

Совершенно очевидно, что в каждой из этих трех систем воду высшей степени очистки можно получать, используя различные функциональные узлы, и что для сохранения качества воды высшей степени очистки до места ее использования по назначению важную роль в равной мере играют, с одной стороны, трубопроводы, сборный танк и распределительная система, а, с другой стороны, проектирование технологических установок..





---

## ГЛАВА 45

---

# СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ

---

Понимание химизма процессов обработки воды является первым шагом на пути к разработке такой программы обработки воды химическими реагентами, которая при умеренных затратах обеспечит получение воды, качество которой удовлетворяет заданным характеристикам в отношении жесткости, содержания растворенных твердых веществ, диоксида кремния и других загрязняющих примесей. Следующий важный этап - выбор надежной системы дозирования химических реагентов - датчиков и приборов, органов управления и дозаторов - для правильного и точного дозирования необходимых химических веществ при проведении любого процесса обработки.

С этой целью разработаны самые различные типы дозаторов для подачи химических реагентов. Могут потребоваться системы для дозирования сухих продуктов, например, извести, или жидких продуктов, таких как квасцы или раствор едкого натра. Заводу по производству крафт-целлюлозы и крафт-бумаги мощностью 1000 т/сутки (908 т/сутки) при расходе воды 98 400 м<sup>3</sup>/сутки и при добавлении 120 мг извести/л для умягчения воды потребуется 25 000 фунтов извести/сутки (11 300 кг/сутки). Тот же завод может производить пар высокого давления в объеме 5 000 000 фунтов/сутки (2 270 000 кг/сутки), для этого требуется гидразин в количестве 208 ррб (частей на миллиард) или всего 0,1 фунта/сутки (0,04 кг/сутки). Перед проектировщиком стоит задача разработать систему дозирования извести в количестве 12,5 т/сутки и систему дозирования гидразина в количестве 0,1 фунта/сутки. Проблемы создания запасов химических реагентов, конечно, тоже требуют совершенно разных решений, если речь идет о хранении и погрузочно-разгрузочных операциях с химическими продуктами массового производства, транспортировка которых осуществляется навалом или наливом, и специализированными химикалиями, поставляемыми в ведрах, бочках или мешках. Характеристики обычных химических реагентов для обработки воды, определяющие их стойкость при хранении, приведены в Табл. 45.1. В этой главе даны рекомендации относительно того, как из наиболее широко применяемых систем дозирования жидких и сухих химических веществ, используемых для обработки воды, выбрать наиболее подходящую систему, и какой должна быть скорость подачи, которая может составлять от нескольких фунтов до нескольких тонн в сутки.

---

### **СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ**

---

Существуют различные дозаторы для капельной подачи жидких реагентов; это могут быть подающие механизмы с постоянным напором, используемые для подачи жидкостей в очень малых количествах (как при внутривенном влипании) и дозаторы для подачи кислоты в больших количествах из складских резервуаров. Однако, в большинстве случаев, при химической обработке требуется точность дозирования реагентов, поэтому в данной главе будут рассмотрены только те системы, где используются (1) дозировочные насосы или насосы, регулируемые потоком, выбор которых осуществляется в зависимости от требуемой скорости подачи и технических условий подачи (дозировемый химический реагент, концентрация, давление, температура и т.д.); или (2) устройства для декантации, управляемые электродвигателем, соединенные с ресиверами и подающими не дозировочными насосами.

Таблица 45.1. Химические реагенты, широко применяемые для обработки воды

Химический реагент	Общепринятое название	Типичный состав	Эквивалентный вес	Объемный вес, фунтов/футов или фунтов/галл.	Приближит. значе- рН1% раствора	Растворимость
Сульфат алюминия [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> • 14 H <sub>2</sub> O]	Квасцы	Кусковой - 17% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Жидкий - 8,5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100*	60	3,4	4,2 фунт./галл при 60 °F
Бентонитовая глина	Бентонит			11	-	
Карбонат кальция (CaCO <sub>3</sub> )	Известняк	96% CaCO <sub>3</sub>	50	80	8	Нерастворимая
Гидроксид кальция [Ca(OH) <sub>2</sub> ]	Гидратная известь, гаш-я известь	96% [Ca(OH) <sub>2</sub> ]	40*	40	12	Нерастворимый
Гипохлорит кальция [Ca(OCl) <sub>2</sub> • 4H <sub>2</sub> O]	НТН	70% Cl <sub>2</sub>	103	55	6-8	3% при 60 °F
Оксид кальция (CaO)	Негашеная известь, известь	96% CaO	30*	60	12	Гасить при 10 - 20%
Сульфат кальция (CaSO <sub>4</sub> • 2H <sub>2</sub> O)	Гипс	98% гипса	86*	55	5-6	Нерастворимый
Хлор (Cl <sub>2</sub> )	Хлор	Газ - 99,8% Cl <sub>2</sub> Чистый 98%	35,5	газ	-	0,07 фунт./гал при 60 °F
Сульфат меди (CuSO <sub>4</sub> • 5H <sub>2</sub> O)	Медный купорос	Чистый 98%	121*	75	5-6	2 фунт./галл при 60 °F
Доломитовая известь [Ca(OH) <sub>2</sub> • MgO]	Доломитовая известь	36-40% MgO	67 †	40	12,4	Нерастворимая
Хлорид железа (3) (FeCl <sub>3</sub> • 6H <sub>2</sub> O)	Хлористое железо	Кусковой - 20% Fe Жидкий - 20% Fe	91*	7013	3-4	45% при 60 °F
Сульфат железа (3) [Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> • 3H <sub>2</sub> O]	Сульфат железа	18,5% Fe	51,5*	70	3-4	30% при 60 °F
Сульфат железа (2) [FeSO <sub>4</sub> • 7H <sub>2</sub> O]	Мелатерит	29% Fe	139*	70	3-4	1 фунт./галл при 60 °F
Хлористоводородная кислота (HCl)	Соляная кислота	30% HCl 20° по Боме	120*	9,6	1-2	35% при 60 °F
Алюминат натрия (NaAlO <sub>2</sub> )	Алюминат	Хлопя - 46% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Жидкость - 26% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100*	5013	11-12	40% при 60 °F
Хлорид натрия (NaCl)	Каменная соль, соль	Чистый 98%	58,5	60	6-8	2,6 фунт./галл при 60 °F
Карбонат натрия (NaCO <sub>3</sub> )	Кальцинированная сода Чистый Na <sub>2</sub> O 58%	Чистый 98%	53	60	11	1,5 фунт./галл при 60 °F
Гидроксид натрия (NaOH)	Едкий натр, каустик, щелок	Хлопя - 99% NaOH Жидкость - 50 - 70%		65	12,8	70% при 60 °F
Фосфат натрия (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	Динатрийфосфат	49% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	47,3	55	9	20% при 60 °F
Метафосфат натрия (NaPO <sub>3</sub> )	Гексаметафосфат	66% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34	47	5-6	1 фунт./галл при 60 °F
Серная кислота (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Купоросное масло	94 - 96%/66° по Боме	50*	15	1-2	Неограниченная

\* Полезный эквивалентный вес товарного продукта  
† Полезный эквивалентный вес в расчете на содержание Ca(OH)<sub>2</sub>

### Объемные насосы

В объемных (нагнетательных поршневых) насосах жидкость сначала всасывается в полость, а затем вытесняется через выходное отверстие в нагнетательный трубопровод. Объем подачи относительно не зависит от напора нагнетания и подача никогда специально не регулируется дросселем. Для защиты этих насосов от случайного отключения нагнетательного трубопровода необходимо установить предохранительные клапаны. Для каждого продукта и для каждого места подачи должен быть предусмотрен отдельный насос. Общей ошибкой является попытка использовать один насос для подачи химического реагента в нескольких местах, (например, для подачи хелатообразующего раствора в три баббана котла на одной паросиловой установке). При помощи дроссельных клапанов невозможно регулировать разделение потока на три питательные линии; для каждого места подачи требуются отдельные насосы. Для обеспечения возможности технического обслуживания без перерыва в подаче химических реагентов следует предусмотреть резервные насосы.

Насос возвратно-поступательного действия (Рис. 45.1) имеет поршень, который перемещается в цилиндре и при каждом ходе поршня объем подачи примерно равен произведению площади поперечного сечения поршня на длину хода. Как на стороне всасывания, так и на стороне нагнетания жидкость проходит через обратные клапаны, следовательно, имеет место небольшой обратный поток или изменение подачи насоса с изменением давления нагрузки; поэтому эти насосы называют также "дозировочными насосами". Давление нагнетания изменяется от обычного давления в магистральном водопроводе установки, составляющего 50 - 100 фунтов/кв. дюйм (3,4 - 6,9 бар), до давления паровых котлов 3000 фунтов/кв. дюйм (207 бар). Для того чтобы обеспечить быстрое и плотное закрытие обратных клапанов, важно иметь на стороне нагнетания небольшое противодействие. Если давление в системе для этого слишком низкое, то жидкость часто подает через систему предохранительных клапанов для создания минимального эффективного давления для закрытия обратных клапанов. На стороне нагнетания имеет место пульсирующий поток и иногда требуется его выравнивание для обеспечения равномерной подачи химических реагентов.

Ниже приведены несколько примеров применения насосов возвратно-поступательного действия.

1. *Использование химических веществ массового производства.* Ниже указаны химические реагенты, подача которых осуществляется непосредственно из резервуаров для хранения жидких продуктов.

*Каустик, 50 % NaOH.* Наиболее часто используется для регенерации деминерализаторов, при которой средний расход может составлять от 2 галл./час до 10 галл./мин (от 7,6 л/час до 37,9 л/мин). На выходе поток разбавляют до концентрации примерно 5 %, так чтобы при приближении к слою ионита с относительно равномерной концентрацией уменьшить колебания скорости подачи.

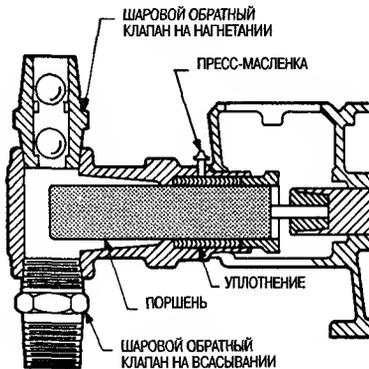


Рис. 45.1 Простой насос возвратно-поступательного действия, используемый для подачи химических реагентов в сравнительно небольшом объеме, при изменении давления нагнетания от нормального давления в трубопроводах системы водоснабжения до давления паровых котлов (Публикация с разрешения Milton Roy Company.)

**Квасцы, 50 % жидкость.** Обычно используются для коагуляции, при которой средняя скорость подачи может изменяться в пределах 2 галл./час - 2 галл./мин (7,6 л/час - 7,6 л/мин). При подаче квасцов в отстойник колебания расхода не представляют проблемы.

**Серная кислота, 94 %  $H_2SO_4$ .** Обычно используется для регенерации деминерализаторов, при которой скорость подачи составляет 2 галл./час - 20 галл./мин (7,6 л/час - 76 л/мин). Пульсация потока уменьшается в системе конечного разбавления. Кроме того, серная кислота используется в градирнях для регулирования щелочности и значения pH, в этом случае скорость подачи составляет 2 галл./час - 20 галл./мин.

Следует отметить, что в вышеприведенных примерах стоимость поршневого насоса возвратно-поступательного действия при скорости подачи, равной 1 галлон в минуту (или 1 литр в минуту) настолько высока, что обычно чаще применяют экономически более выгодные центробежные или шестерчатые насосы.

- Использование специализированных химикалий. В этих случаях общий расход часто не превышает 2 галл./час (7,6 л/час). Если химикалии используют в очень малых количествах, например, менее 5 галл./сутки (18,9 л/сутки), продукт перед подачей обычно разбавляют до концентрации 5 - 10 % для повышения точности регулирования скорости подачи.

Регулирование скорости подачи насосов возвратно-поступательного действия можно осуществлять тремя указанными ниже способами.

- Регулирование длины хода поршня. Между вращающимся приводным валом и поршнем возвратно-поступательного хода имеется коленчатый рычаг. Шарнир качающегося коленчатого рычага может находиться на конце рычага, обеспечивая максимальную длину хода поршня, или - в центре приводного вала, в этом случае возвратно-поступательное движение равно нулю (Рис. 45.2). Регулирование длины хода поршня часто выполняется вручную при работающем приводном двигателе. Однако, имеются специальные приборы для дистанционного регулирования длины хода поршня из центрального помещения управления либо вручную, либо при помощи приборов, например, при помощи регулятора значения pH.

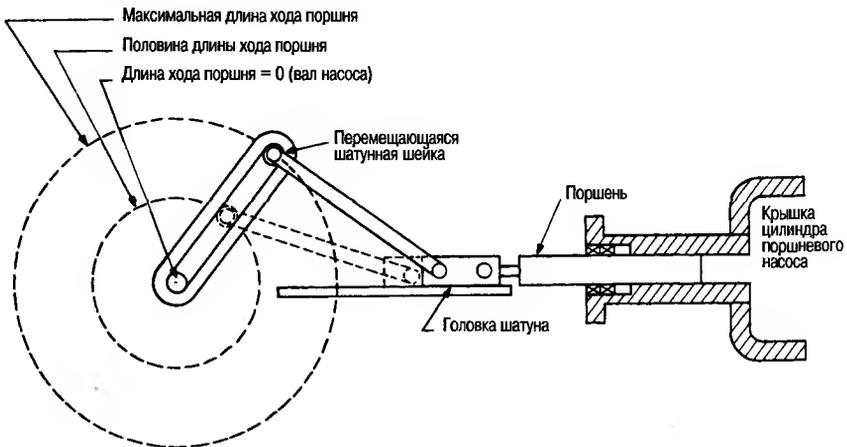


Рис. 45.2 Регулирование скорости подачи насоса возвратно-поступательного действия проводится путем регулирования длины хода поршня

## СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ

2. Частота вращения ротора насоса. Приводом может служить электродвигатель постоянного тока с регулированием скорости при помощи реостата или зубчатая передача с регулируемой скоростью, что упрощает регулирование скорости подачи. Некоторые насосы имеют электромагнитное управление при помощи соленоида, а не электродвигателя. Изменение скорости подачи насоса осуществляется путем изменения частоты срабатывания соленоида.
3. Прерывание хода поршня. В цилиндре насоса имеется устройство для прерывания хода поршня, даже если головка шатуна обеспечивает максимальную длину хода.

Простой насос возвратно-поступательного действия имеет ряд модификаций, в которых предусмотрена защита поршня от контакта с перекачиваемой жидкостью, как правило, в целях предупреждения коррозии или во избежание ущерба в результате утечки рабочей жидкости из сальников на пол. Исходя из этих соображений, обычно применяют диафрагменные насосы. Иногда поршень непосредственно соединен с диафрагмой, но обычно диафрагма устанавливается в головке цилиндра с масляным уплотнением (Рис. 45.3).

Насос возвратно-поступательного действия работает по законам гармонического движения, поэтому для обеспечения максимальной скорости подачи коленчатый рычаг должен находиться под прямым углом к направлению линейного перемещения головки шатуна. В этой точке скорость рабочей жидкости при поступлении ее в головную часть насоса и обратно в 3,14 раза больше средней скорости потока. Это следует принимать во внимание при расчете трубопроводов. Более того, увеличение скорости потока рабочей жидкости с 0 до величины, в 3,14 раза превышающей среднюю скорость потока, исключает значительный напор, создаваемый на всасывании атмосферным давлением; часто только за счет этого давления можно заполнить полость насоса. Поэтому для этих насосов, несмотря на соблазн упростить систему путем монтажа на емкости с химическими реагентами, важно обеспечить захлебывание на всасывании.

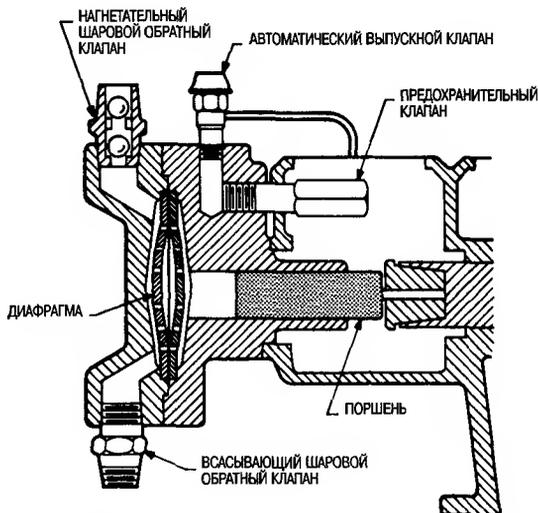


Рис. 45.3 Диафрагменный насос, приводимый в действие давлением масла, которое создается за счет перемещения поршня насоса в масляном резервуаре (Публикация с разрешения Milton Roy Company.)

По тем же причинам возникают проблемы при подаче насосом вязких продуктов; при работе с вязкими химическими веществами следует получить консультацию специалиста по насосам. В Табл. 45.2 указана вязкость некоторых часто используемых рабочих жидкостей, а на Рис. 45.4 показано соотношение между значениями кинематической вязкости, выраженной несколькими способами.

Таблица 45.2 Вязкость некоторых часто используемых рабочих жидкостей\*  
[Данные, полученные на основе измерений при 20°C (68°F)]

Жидкость	Удельный вес	Вязкость, сантипуаз	Кинематическая вязкость, сантистокс	Английские единицы вязкости, кв. фут/с ( $\times 10^{-5}$ )	Вязкость в секундах по универсальному вискозиметру Сейболта
Вода	1,00	1,0	1,0	1,076	31,0
Этанол	0,79	1,2	1,52	1,64	31,7
Насыщенный рассол	1,19	3,0	2,5	2,69	34,0
HCl, 31,5 %	1,05	2,0	1,9	2,04	33,0
NaOH, 30 %	1,33	13,3	10,0	10,76	59
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 66° по шкале Боме	1,84	26,7	14,5	15,6	75
Пропиленгликоль	1,04	54	52	56	245
Моторные масла					
10 W	0,90	90	100	108	470
30 W	0,90	315	350	377	1650
Глицерин	1,26	781	620	667	2950

\* Соотношение значений вязкости:  
Метрические единицы:

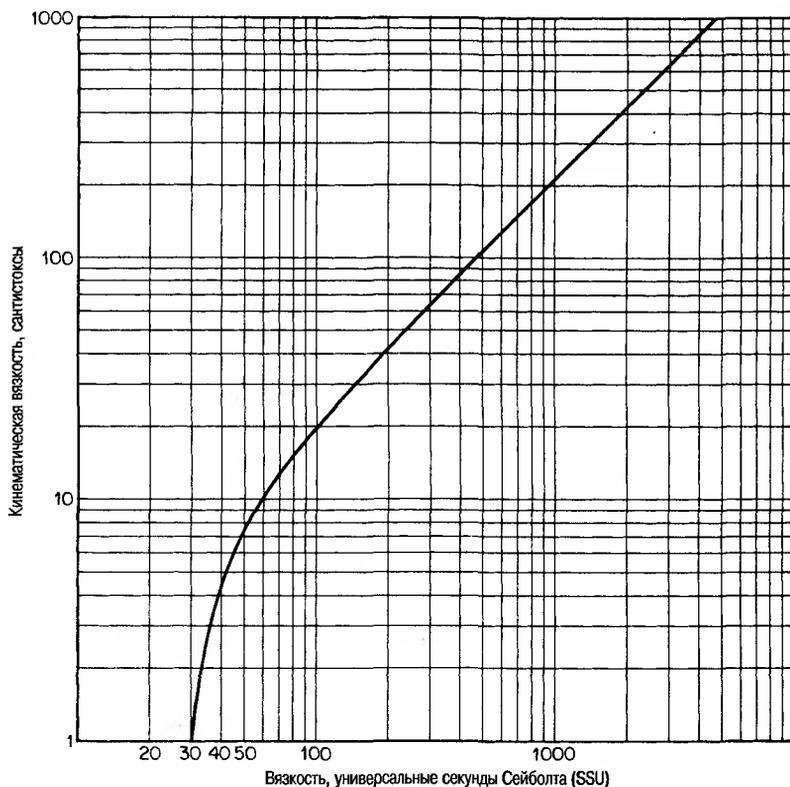
$$\text{сантистоксы} = \frac{\text{абсолютная вязкость (сантипуаз)}}{\text{плотность (г/см}^3\text{)}}$$

Английские единицы: кв. фут/с = сст  $\times 1,076 \times 10^{-5}$   
Универсальные секунды по вискозиметру Сейболта (SSU): время, в течение которого рабочая жидкость в определенном объеме проходит через стандартную измерительную диафрагму при контролируемой температуре. Поскольку определение вязкости проводится в условиях течения рабочей жидкости, значение вязкости, выраженное в секундах по универсальному вискозиметру Сейболта, скорее относится не к абсолютной, а к кинематической вязкости.  
*Примечание:* На Рис. 1.6 показана зависимость вязкости воды от температуры.

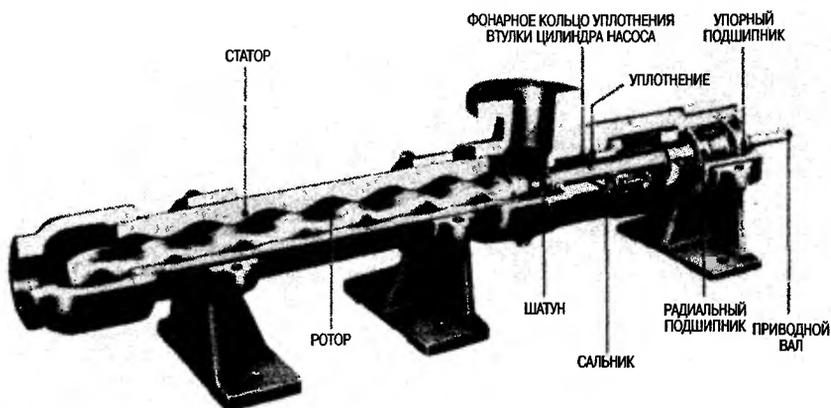
Второй основной тип объемных насосов - ротационный насос, который обеспечивает скорее непрерывный, чем пульсирующий поток. Насосы этого типа могут иметь два конструктивных решения: насос с расширяющимся рабочим объемом (винтовой насос с неравномерным шагом винта) (Рис. 45.5) и шестеренчатый насос (Рис. 45.6). Регулирование дросселем или изменение давления на выходе оказывает на работу насоса этого типа более заметное влияние, чем на работу насоса возвратно-поступательного действия, но таким способом нельзя регулировать скорость подачи, так как это может привести либо к сгоранию электропривода, либо к разрушению корпуса насоса. В отличие от насоса возвратно-поступательного действия, ротационный насос успешно применяется при работе с вязкими жидкостями; фактически, такой насос лишь в редких случаях рекомендуют использовать при работе с водой или растворами, вязкость которых не превышает примерно 50 SSU, будь то водные растворы или органические жидкости. Ниже приведены примеры применения ротационных объемных насосов.

1. Использование химических веществ массового производства, подача которых осуществляется непосредственно из резервуаров для хранения жидких продуктов, таких как:

## СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ



**Рис. 45.4** Соотношение между значениями кинематической вязкости и эмпирическими значениями вязкости, выраженной в универсальных секундах по вискозиметру Сейболла, при температуре 20°C (68°F).



**Рис. 45.5** Винтообразный вал, вращающийся в упругом статоре соответствующей формы, обеспечивает расширение рабочего объема насоса и подачу непрерывного потока на стороне нагнетания (Публикация с разрешения Fluids Handling Division of Robbins & Myers, Inc.)

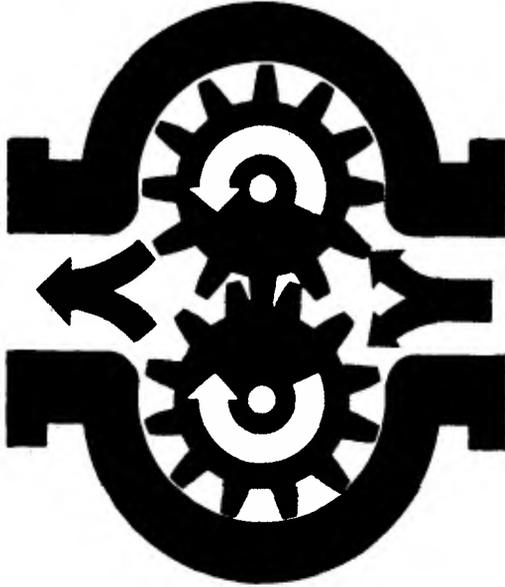


Рис. 45.6 В шестеренчатом насосе полости между зубьями зубчатых колес (шестерен) и корпусом перемещаются со стороны всасывания на сторону нагнетания и изолированы друг от друга за счет зацепления зубчатых колес. Одно зубчатое колесо является ведомым, а другое - промежуточным (Публикация с разрешения *Liquiflo Equipment Co.*)

Каустик, 50 % NaOH. Скорость подачи - более 1 галл./мин (3,8 л/мин), как при регенерации деминерализаторов.

Квасцы, 50 % жидкость. Скорость подачи - более 1 галл./мин (3,8 л/мин), как в больших системах коагуляции-флокуляции.

Серная кислота, 94 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Скорость подачи - более 1 галл./мин (3,8 л/мин), как при регенерации деминерализаторов и при использовании кислоты в системах градирен.

Насосы этого типа применяются для подачи известковых суспензий, однако из-за тенденции к осаждению насос должен работать с максимальной скоростью подачи.

## 2. Использование специализированных химикалий, таких как:

Растворы высокомолекулярных полимеров, используемые в процессе флокуляции. Насос применяется для приготовления исходного раствора (0,5 - 2,0%), который хранится в расходном баке, вмещающем объем, требуемый для работы в течение суток, и иногда для подачи исходного раствора в линию разбавления на пути к месту использования, если скорость подачи превышает 1 галл./мин (3,8 л/мин).

Эмульсионные высокомолекулярные полимеры в товарном виде. Насос этого типа используется для подачи продукта из складских емкостей в специальную систему подачи, в которой предусмотрено разбавление.

Регулирование скорости подачи ротационного насоса такого типа осуществляется двумя способами, из которых фактически только один может использоваться для регулирования самого насоса. Скорость подачи насоса можно регулировать путем изменения частоты вращения ротора насоса или же можно

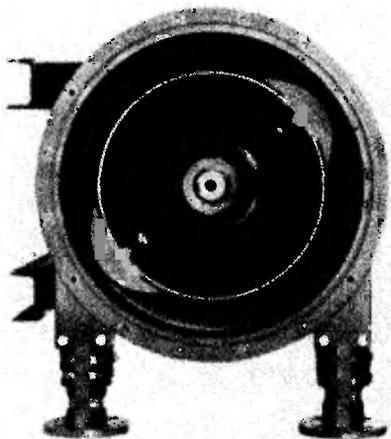


Рис. 45.7 В шланговом насосе рабочая жидкость проходит через трубку под давлением прижимных валиков (Публикация с разрешения Waukesha/Bredel Peristaltic Hosepump, Waukesha Div., Abex.)

периодически прерывать поток при помощи перепускного клапана с таймером, возвращая жидкость со стороны нагнетания насоса по байпасу в расходный бак.

Другой тип насоса с расширяющейся рабочей полостью - перистальтический (шланговый) насос (Рис. 45.7). Небольшие насосы такого типа используются во многих приборах, предназначенных для отбора проб, автоматического титрования и колориметрических измерений. Они применяются в медицине. Насосы такого типа создают лишь ограниченный напор, и необходим тщательный контроль перистальтического воздействия на гибкие трубки (шланги), чтобы своевременно заменить их, прежде чем произойдет разрыв. Они могут использоваться для подачи рабочих жидкостей с низкой вязкостью. Объемная скорость потока регулируется путем изменения скорости прижимных валиков, которые "давят" трубки, или путем замены трубок различного диаметра.

Для роторных объемных насосов требуется всасывающий трубопровод большого диаметра и небольшой длины с ограниченным числом клапанных устройств и патрубков, а также гидростатический напор, достаточный для подачи вязких рабочих жидкостей. Рабочая жидкость служит смазочным материалом для подвижных деталей, поэтому важно обеспечить непрерывный поток. Ни в коем случае нельзя допускать, чтобы насос этого типа продолжал работать при срабатывании запорной арматуры на стороне нагнетания или при отсутствии рабочей жидкости во всасывающем трубопроводе.

### Центробежные насосы

В корпусе насоса этого типа с высокой скоростью - обычно 1800 или 3600 об./мин вращается рабочее колесо (колесо с радиальными лопатками). Жидкость поступает в центральную часть рабочего колеса и под действием центробежной силы с возрастающей скоростью направляется на периферию корпуса, где за счет скорости создается напор. Жидкость выходит из канала, находящегося на периферии корпуса, по касательной.

Наиболее широко применяется центробежный насос со спиральным отводом (Рис. 45.8). На рабочем колесе этого насоса имеются лопатки со спираль-

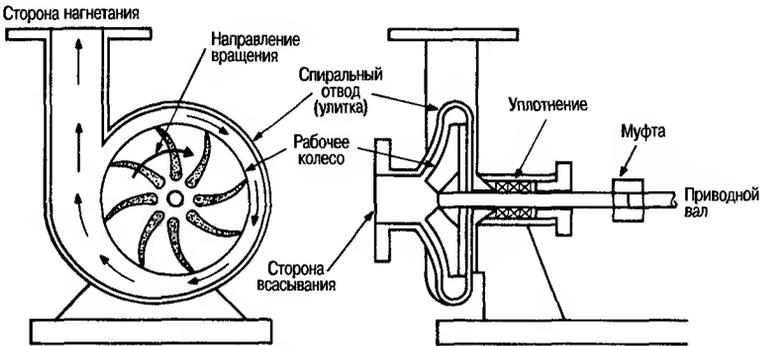


Рис. 45.8 Центробежный насос со спиральным отводом с открытым рабочим колесом



Рис. 45.9 Центробежный насос с открытым рабочим колесом, используемый для подачи суспензий, например, извести или глины (*Публикация с разрешения Ingersoll-Rand.*)

ными проходами, они закрепляются вблизи центра и заканчиваются у края рабочего колеса. В конструкции с открытым рабочим колесом эти лопатки можно увидеть, если снять корпус насоса; насос с закрытым рабочим колесом имеет более высокий КПД, лопатки помещены в корпус между диском рабочего колеса и тонкостенной крышкой с отверстием вблизи входа рабочей жидкости, образуя сэндвич-структуру. Насос с открытым рабочим колесом (Рис. 45.9), в основном, применяется для подачи суспензий, а с закрытым (Рис. 45.10) - для подачи прозрачных жидкостей, в первую очередь, на больших насосных станциях систем водоснабжения. Во избежание внутренней рециркуляции и снижения эффективности зазоры должны быть закрыты. Скорость подачи обычно регулируют дросселем на стороне нагнетания. Ниже приведены примеры использования центробежных насосов со спиральным отводом.

Гашеная известь, 5 - 10 % суспензия. Во многих системах известь подают в виде суспензии из расходного бака с суточным запасом, в котором проводится приготовление этой суспензии. В приведенном ранее примере при загрузке 25 000 фунтов извести/сутки (11 000 кг/сутки) система будет перекачивать около 250 000 фунтов суспензии/сутки (110 000 кг/сутки), т.е. средняя скорость подачи известковой суспензии должна быть равна примерно 20 галл./мин (75 л/мин). Во избежание осаждения в линиях подачи извести рекомендуется система рециркуляции, особенно при подаче извести в таких больших объемах. Скорость подачи рециркуляционного насоса в систему может составлять 50 галл./мин, при пе-



Рис. 45.10 Центробежный насос с закрытым рабочим колесом, используемый для подачи чистых (прозрачных) жидкостей. Он обеспечивает более высокую эффективность эксплуатации, чем насос с открытым рабочим колесом (Публикация с разрешения Ingersoll-Rand.)

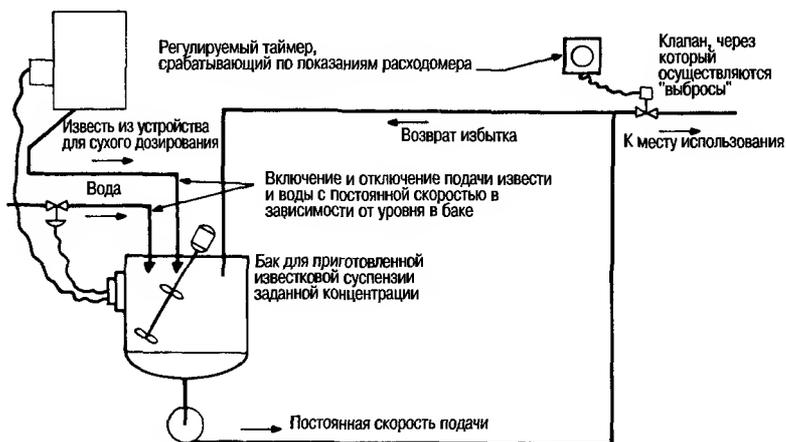


Рис. 45.11 Схема пропорциональной подачи извести с регулированием дозировки при помощи таймера, срабатывающего по показаниям расходомера, при больших объемах подачи.

риодических "выбросах" в объеме 40 галл./мин (150 л/мин) в месте подачи в течение 50% времени работы насоса (Рис. 45.11).

Рассол (насыщенный раствор  $\text{NaCl}$ ). На многих городских цеолитовых умягчающих установках воды соль подается насыпью в резервуар для мокрого хранения соли (см. главу 12). В процессе регенерации 26 %-ный солевой раствор обычно подают непосредственно из резервуара для насыщения на цеолитовый умягчитель со скоростью до 50 галл./мин (190 л/мин), обычно через дозатор. Для этой цели идеально подходят центробежные насосы.

Так как скорость подачи зависит от давления на стороне нагнетания, что следует из типичной рабочей характеристики центробежного насоса, Рис. 45.12, необходимо регулировать поток, поскольку возможно изменение давления в трубопроводах и нарушение заданных параметров потока. Поэтому часто применяют регулятор скорости подачи, приводимый в действие расходомером.

Одним из основных ограничений для применения насосов со спиральным отводом является вязкость. Насосы со спиральным отводом с трудом обеспечи-



Рис. 45.12 Типичная рабочая характеристика центробежного насоса с открытым рабочим колесом. Расчетная точка обеспечивает возможность регулирования потока в разумных пределах путем дроселирования давления на стороне нагнетания. Максимальная мощность требуется при нулевом напоре нагнетания.

вают подачу рабочей жидкости, имеющей высокую вязкость. При подаче абразивных суспензий эти насосы также находят лишь ограниченное применение. При этом необходимо использование сальников на валу насоса, для того чтобы промывная вода после промывки уплотнения поступала в корпус насоса. Промывная вода должна быть неореакционноспособной по отношению к известковой суспензии; не допускается использовать даже воду, прошедшую обработку на установке цеолитового умягчения. Реакция известки с любой разбавляющей водой может стать причиной образования отложений в насосе и трубопроводах.

Корпус насоса и рабочее колесо обычно представляют собой конструкцию, отлитую из железа, стали, бронзы или латуни. Из некоторых сплавов трудно или экономически невыгодно изготавливать литые изделия, поэтому в тех случаях, когда необходимо использовать именно эти сплавы, можно отказаться от применения насосов со спиральным отводом. Из центробежных насосов различных типов намного реже применяется турбонасос (Рис. 45.13). В таком насосе давление повышается постепенно в процессе прохождения рабочей жидкости по лопаткам, установленным по окружности диска рабочего колеса, и ее постепенной рециркуляции от входного до выходного отверстия при повороте лопаток на 360°. Насос этого типа по своим характеристикам ближе к объемному насосу, чем к насосу со спиральным отводом; поток нельзя регулировать дроселированием на стороне нагнетания. Так как корпус насоса и рабочее колесо можно обрабатывать на станках, для изготовления насоса этого типа можно использовать различные сплавы, в зависимости от требований к конструкционным материалам при подаче тех или иных химических веществ. Не рекомендуется применять этот насос для подачи вязких рабочих жидкостей.

Как уже было указано выше, для регулирования скорости подачи центробежных насосов, применяемых для подачи жидкости из резервуаров для хранения жидких продуктов в больших объемах [более 10 галл./мин (38 л/мин)], можно использовать регуляторы потока, приводимые в действие расходомером: это могут быть регуляторы, либо срабатывающие при потере напора, либо изменяющие площадь сечения потока (ротаметр). Устройством, которое находит наиболее широкое применение при подаче жидкостей и используется для подачи 5 - 10% -ных химических растворов или суспензий в отстойники или на установки умягчения известью, когда скорость подачи химических веществ обычно не превышает примерно 500 фунтов/сутки (225 кг/сутки), является аппарат для декантации (декантатор), Рис. 45.14. Этот аппарат представляет собой резервуар для химического раствора, в котором находится суспензия (например, известь

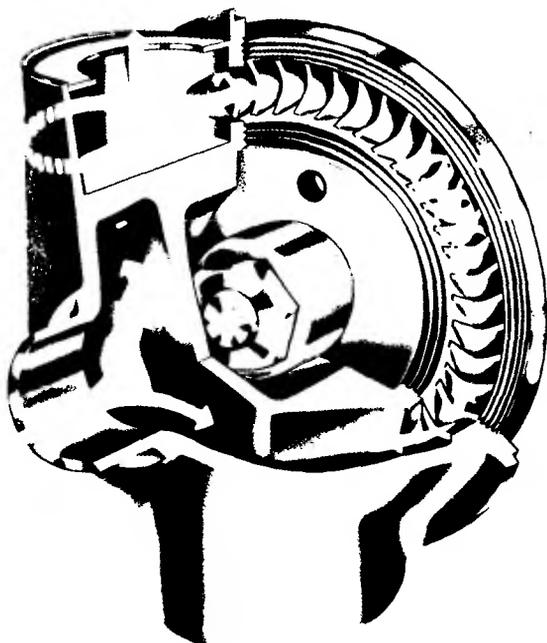


Рис. 45.13 Турбонасос, работающий как центробежный насос, имеет много общего с объемным насосом и насосом со спиральным отводом (Публикация с разрешения Burks Pumps, Decatur Pump Co.)

или глина) или раствор (например, квасцов, каустика или кальцинированной соды); в резервуаре имеется труба для декантирования, приводимая в действие электродвигателем; эта труба опускается в жидкость с постоянной скоростью в пределах 0,1 - 0,3 дюйма/мин (0,25 - 0,75 см/мин). Электродвигатель срабатывает по показаниям таймера. Декантированная жидкость поступает в приемник, где ее разбавляют, и готовый раствор подают центробежным насосом к месту использования. Дозировку можно легко изменить путем изменения установки таймера, и, если это возможно, путем изменения концентрации раствора. В такой системе центробежный насос используется для подачи раствора к месту использования, однако, его работа не влияет на расход или скорость подачи.

Недостаток такого устройства при подаче растворов сухих химикатов заключается в том, что требуется ручная загрузка химикатов обычно из мешков весом 50 фунтов (23 кг). Если доля затрат ручного труда слишком велика, то сухие химикаты можно подавать непосредственно из бункеров для хранения при помощи устройств для сухого дозирования реагентов.

### **СИСТЕМЫ СУХОГО ДОЗИРОВАНИЯ**

Кроме дозаторов жидкостей, применяются устройства для сухого дозирования химических реагентов, получаемых в сухом виде и насыпью, в больших объемах. При подаче извести в виде суспензии при помощи дозатора жидкости для подачи 1 куб. фута суспензии, имеющей концентрацию 5 %, потребуется доставить всего лишь около 3 фунтов (1,4 кг) извести к месту использования. С дру-

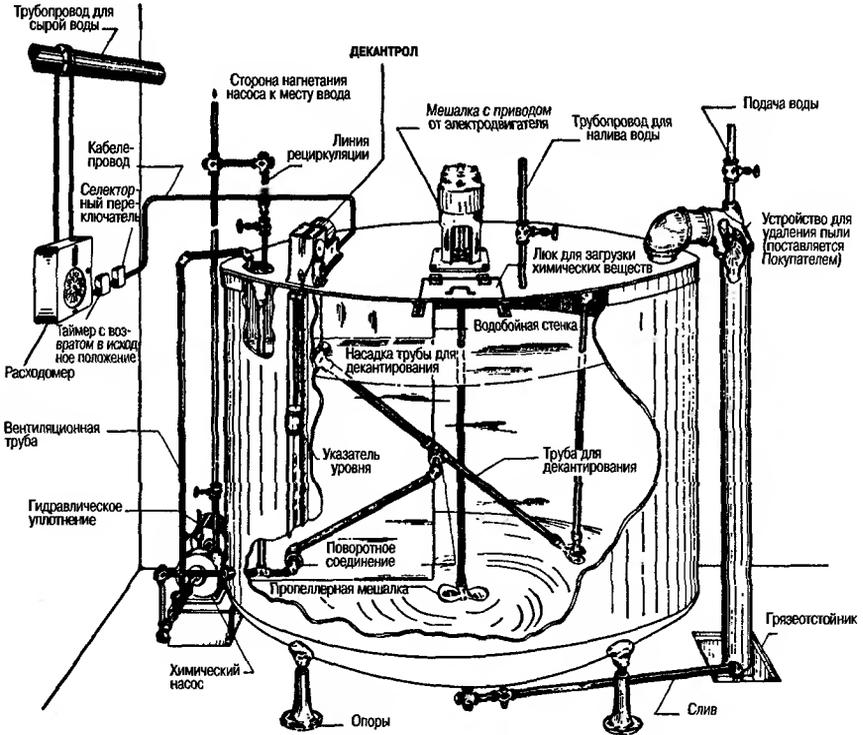


Рис. 45.14 В декантаторе сборная труба для декантирования опускается с постоянной скоростью в течение заданного периода времени, обеспечивая отвод химического реагента из резервуара в расходный бак для подачи к месту использования (Публикация с разрешения Crane Company, Cochrane Division.)

гой стороны, один кубический фут (0,028 м<sup>3</sup>) извести, подаваемый при помощи устройства для сухого дозирования, обеспечивает получение 40 фунтов (18 кг) извести, что более чем в 10 раз превышает объем, получаемый при помощи дозатора жидкостей. Основные преимущества устройства для сухого дозирования заключаются в том, что оно - более компактное, менее дорогостоящее и может применяться для дозирования веществ, подаваемых в это устройство насыпью.

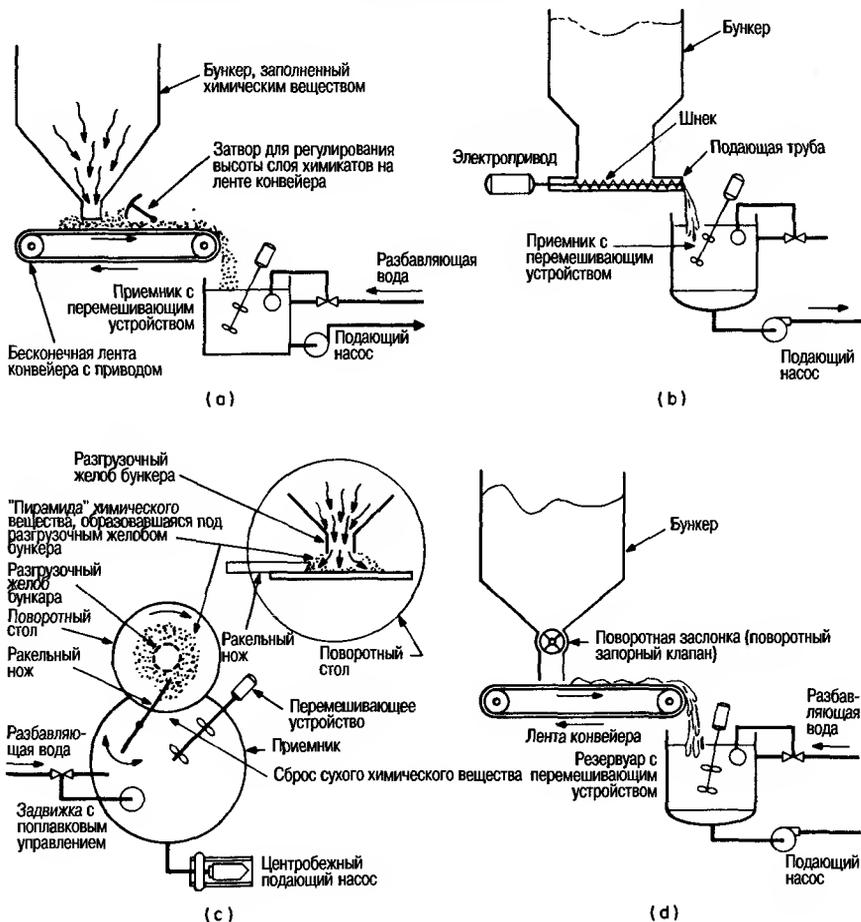
Устройства для сухого дозирования широко применяются не только на водоочистных станциях, но и в других отраслях промышленности; при помощи этих устройств осуществляется подача больших объемов угля на тепловые электростанции, работающие на угле, и химических веществ - в химической и горной промышленности.

Различают два основных типа устройств для сухого дозирования - объемные и весовые дозаторы. Объемный дозатор имеет более простую конструкцию и меньшую стоимость при точности дозирования по объему около 98 - 99 %; но из-за того, что объемная плотность сухого химического вещества при выходе из бункера или загрузочной воронки изменяется, точность, рассчитанная на основе полученного веса, снижается до 94-95 %. Весовой дозатор имеет более сложную конструкцию и фактически взвешивает подаваемые химические вещества с точностью, превышающей 99 %.

**Объемные дозаторы (Рис. 45.15)**

Сухие химикаты, находящиеся в бункере, поступают самотеком в механизм подачи. Для подачи химикатов с регулируемой скоростью из загрузочного бункера в резервуар или бак для приготовления раствора могут применяться следующие устройства:

1. Ленточный конвейер с затвором определенного типа для регулирования высоты и ширины слоя химикатов, поступающих из разгрузочного желоба бункера.
2. Винтовой конвейер или шнек, вращающийся в трубе вокруг своей оси.



**Рис. 45.15** (а) Бесконечная лента конвейера с затвором, регулирующим высоту слоя химического вещества на ленте. Скорость подачи можно изменять путем изменения скорости привода или путем регулирования высоты регулирующего затвора. (б) Химическое вещество подается шнеком по трубе в приемник. Скорость подачи регулируется путем изменения числа оборотов шнека в минуту. (в) Поворотный стол с разделительным устройством с регулируемой длиной хода. Объем подачи изменяется при изменении скорости вращения стола и длины хода разделительного устройства на столе. (г) Химическое вещество подается на ленту конвейера через поворотную заслонку. Дозировка регулируется путем изменения частоты вращения.

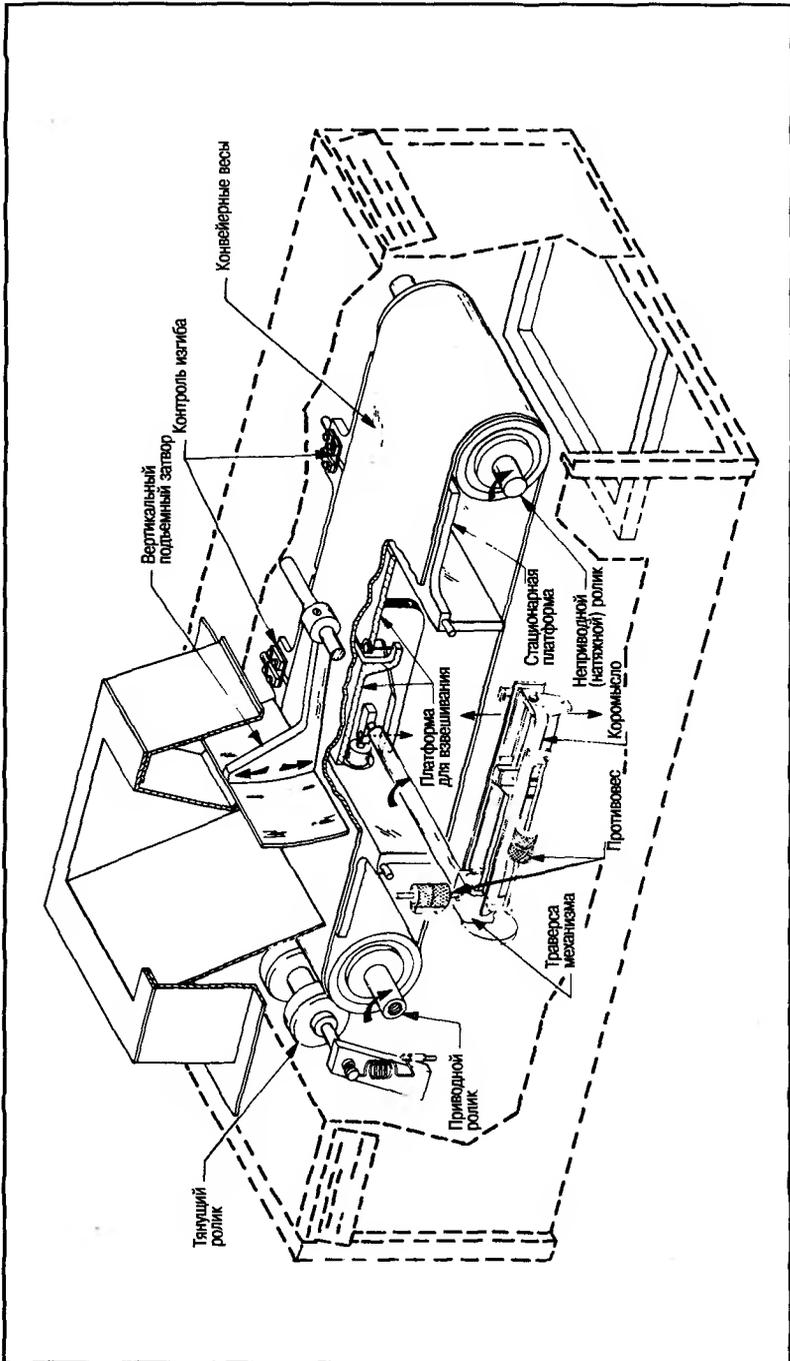


Рис. 45.16 В весовом дозаторе проводится взвешивание сухих химикатов, подаваемых при помощи ленточного конвейера в резервуар для приготовления суспензии или раствора химического вещества (*Публикация с разрешения Wallace & Tieman.*)

## СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ

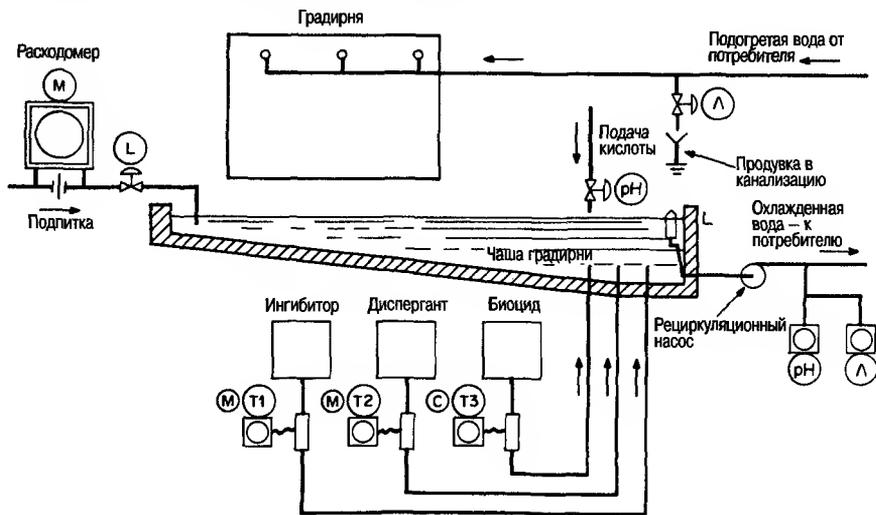
3. Поворотный стол или диск, находящийся непосредственно под разгрузочным желобом бункера, с регулируемым ракельным ножом для отделения химикатов в заданном объеме от стола и подачи их в приемник.
4. Поворотный запорный клапан типа "лопастное колесо", который имеет некоторое сходство с шестеренчатым насосом для перекачивания жидкостей; химикаты подаются в процессе вращения запорного клапана в каждую секцию ленты конвейера в определенном объеме.

Каждое из этих устройств может подавать химические вещества со скоростью, пропорциональной потоку поступающей на обработку воды, либо непосредственно по сигналу расходомера, например, для регулирования скорости ленты конвейера, либо через таймер.

### Весовые дозаторы (Рис. 45.16)

В весовом дозаторе химическое вещество подается из бункера на ленточный конвейер, где проводится взвешивание. Ленточный конвейер подает химикат в расходный бак, предусмотренный почти во всех системах сухого дозирования. При снижении или повышении скорости подачи либо образуется скопление химикатов на ленте конвейера, либо их подача производится со слишком высокой скоростью, что приводит к нарушению равновесия и необходимости вмешательства в процесс подачи, например, с целью настройки регулирующего клапана или скорости вращения поворотного затвора.

При использовании устройств для сухого дозирования любого типа необходимо учитывать влияние некоторых параметров, общих для всех устройств, чтобы обеспечить нормальную работу и надежность в эксплуатации:



**Рис. 45.17** Использование приборов и регуляторов для управления работой оборудования для дозирования химических реагентов, предназначенного для системы охлаждения. (1) Расходомер (М) регулирует подачу ингибитора и дисперганта пропорционально расходу подпиточной воды. Дозировка регулируется отдельными для каждого реагента таймерами или насосом. Управление таймером для регулирования дозировки биоцида осуществляется при помощи часового механизма (С). (2) Управление подпиточным клапаном осуществляется по уровню (L). 3. Управление клапаном на линии продувки осуществляется по показаниям прибора для измерения удельной электропроводности (А). (4) Регулирование подачи кислоты проводится по показаниям прибора для измерения рН (рН). В некоторых системах для регулирования подачи кислоты можно использовать расходомер с ручной коррекцией по отклонению значения рН.

1. Свойства химического вещества, в том числе:
  - a. Подвижность (сыпучесть); этим свойством обусловлена необходимость установки вращающегося затвора в разгрузочном желобе бункера.
  - b. Тенденция к слеживанию; требуется защита от влаги и вибраторы или аналогичные вспомогательные устройства для обеспечения потока вещества.
  - c. Угол трения; для правильного расчета конструкции бункера и питающего желоба.
  - d. Гранулометрический состав; необходимо ограничить количество порошкообразных веществ, которые могут стать причиной повреждения электрических устройств.
  - e. Способ хранения и подачи со склада.
2. Конструкция бункера, желобов и загрузочных воронок; во избежание сегрегации частиц и изменения плотности вещества, подаваемого в дозатор.
3. Условия эксплуатации дозатора, например, диапазон температур и влажность, а также содержание пыли в воздухе.

Существует много способов регулирования работы устройств для дозирования химических веществ, начиная от простой операции включения-выключения насоса и кончая пропорциональным регулированием по показаниям расходомера дозатора с ручной коррекцией по отклонению значения рН. В Табл. 45.3 указаны различные способы, которые находят наиболее широкое применение.

**Таблица 45.3** Типичные программы управления дозаторами химических веществ

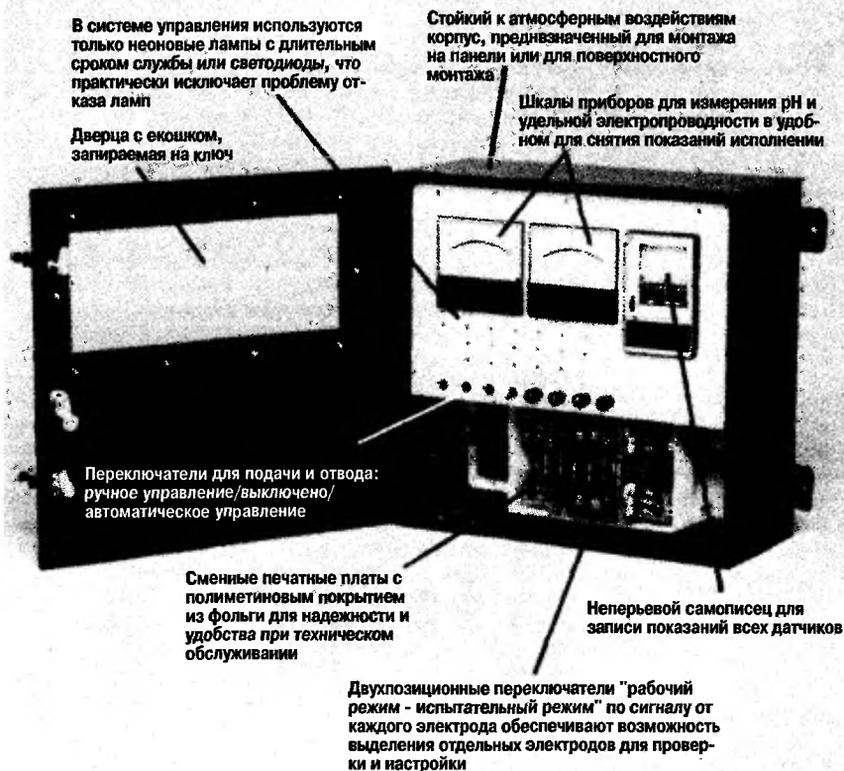
- 
1. Способ включения
    - A. Управление, непропорциональное по отношению к потоку
      - (1) Ручной двухпозиционный орган управления (включен-выключен)
      - (2) Программируемый таймер типа датчика времени, двухпозиционный\*
    - B. Управление, пропорциональное по отношению к потоку
      - (1) Измерительный прибор подает сигнал от интегратора
      - (2) Измерительный прибор подает цифровой сигнал
  2. Способ регулирования дозировки
    - A. Установка таймера в определенное положение, инициируемая сигналом от интегратора (например, таймер регулирует время работы насоса, работу нагнетательного клапана и т.д.)
    - B. Регулирование частоты вращения электродвигателя по цифровому сигналу
    - C. Изменение скорости зубчатой передачи (обычно вручную)
    - D. Изменение механической передачи (например, длины хода поршня насоса, положения затвора и т.д.)
    - E. Возврат выходящего потока в бак для химикатов†

\* Непропорциональное управление обычно применяется при выполнении таких операций, как (а) регенерация ионообменного материала, когда дозировка и концентрация почти не изменяются и объемная скорость потока разбавляющей воды постоянная, и (б) подача полимера в пульсу, поступающую с постоянной скоростью в отстойник для обезвоживания.

† Сигнал о необходимости изменения дозировки поступает от регулятора рН, который можно использовать вместе с расходомером.

На Рис. 45.17 в качестве примера представлена типичная система регулирования процесса обработки химическими веществами, используемая в открытых системах испарительного охлаждения. Для регулирования процесса дозирования большей части химических реагентов (ингибиторы образования накипи и коррозии, дисперганты) применяется расходомер, установленный в трубопроводе для подпиточной воды, а при дозировании других химических веществ (биоциды, кислота) для регулирования можно использовать программируемый датчик времени (таймер) или регулятор значения рН. Продувка системы для

## СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ



**Рис. 45.18** Компактный пульт управления с приборами, используемыми для управления системой, показанной на рис. 45.17.

поддержания допустимого уровня содержания твердых минеральных примесей в воде проводится по показаниям прибора для измерения удельной электропроводности с контактами, срабатывающими при максимальном и минимальном значении электропроводности. На Рис. 45.18 показана возможность монтажа вышеуказанных приборов на одном пульте управления.



---

## ГЛАВА 46

---

# ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

---

Под энергией понимают способность выполнять ту или иную работу. Формы существования энергии разнообразны, но очень редко, когда она легко поддается преобразованию для выполнения полезной работы. Как правило, энергия находится в таком состоянии, что ее использование практически невозможно. Например, физическое тело, скатывающееся вниз по наклонной поверхности, нагревается под действием сил трения, однако это - тепловая энергия, которая, несмотря на то, что является одной из форм энергии, не может выполнить работу по возврату тела в его первоначальное положение.

Энергия существует во многих формах, наиболее известными из которых являются химическая, механическая, электрическая, тепловая, лучистая и ядерная энергия. В настоящее время сильную озабоченность вызывает проблема, связанная с дефицитом химической энергии, заключенной в ископаемых видах топлива - угле, природном газе и нефти. Доступность, распространенность, удобство транспортировки ископаемого топлива, а также высокое содержание в нем энергии и относительная легкость ее преобразования в тепловую энергию, стала причиной их широкого применения во всех областях общественной жизни.

Другой традиционный источник энергии - это механическая энергия воды. Однако этот источник имеет свои ограничения: такая энергия доступна лишь в отдельных географических регионах с обильными осадками, а так же в горных районах. Значительная энергия заключена в морских приливах и волнах, однако, возможность использования такой энергии также ограничена отдельными географическими регионами, и, кроме того, пока еще не разработана практическая технология использования этой формы энергии.

Внутриядерная энергия остается многообещающим источником энергии на будущее. Однако атомная энергетика находится только на начальной стадии развития, поскольку ее дальнейшее развитие сдерживается сильной озабоченностью общественности решением проблем, связанных с обеспечением безопасности и исключением возможного радиационного облучения.

Геотермальная энергия земных недр носит характер случайных и грозных явлений, которые иногда выливаются в катастрофические извержения вулканов. Технологии использования геотермальной энергии также находятся на начальном этапе развития и, кроме того, этот источник энергии ограничен всего несколькими регионами, расположенными в разных частях земного шара.

Поскольку энергию определяют как способность выполнять какую-либо полезную работу, то термин "работа" должен быть проанализирован с большим уклоном на энергию. Если говорить на более доступном языке, то термин "работа" используется для определения любого рода выполняемых работ, однако, у этого термина есть еще и чисто техническое определение. Если человек

поднимает какой-либо груз с уровня пола до уровня поверхности стола, то он или она не только прикладывает первоначальное усилие, но так же и продолжают воздействовать на физическое тело, перемещая его на определенное расстояние. В этом примере работа ( $W$ ) определяется как произведение усилия ( $F$ ), воздействующего на тело равномерно в каждой точке отрезка ( $d$ ), или математически:

$$W = F \times d$$

В этом примере, человек, перемещающий груз, обладал энергией и преобразовал ее в работу. То же самое может быть сказано и о водяном паре, который способен переместить поршень внутри цилиндра или вращать рабочее колесо турбины. Количество энергии, которой обладает физическое тело, равно количеству той работы, которую способно выполнить это физическое тело.

Во что же переходит энергия, которой обладало тело? Она была передана другому телу для приведения его в движение. В этом заключается первый закон термодинамики: *Энергия не может быть вновь создана или уничтожена.*

Если энергия никогда не может быть уничтожена, то как может возникнуть ее дефицит?

Ответ заключается в том, что энергия всегда стремится к минимуму. Проще всего это проследить на примере теплопередачи. Абсолютный нуль ( $-460^{\circ}\text{F}$  ( $-273^{\circ}\text{C}$ )) - полное отсутствие какой-либо тепловой энергии. Любое физическое тело с температурой выше абсолютного нуля содержит некоторую тепловую энергию. Кусок льда при  $32^{\circ}\text{F}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ) обладает значительным количеством тепловой энергии; но энергия такого рода не способна оказывать воздействие, например, на кастрюлю с теплой водой. Напротив, теплая вода оказывает воздействие на лед, расплавляя его, что, в свою очередь, приводит к снижению собственной температуры воды в кастрюле. Теперь кастрюля воды содержит тепловую энергию, равную сумме значений первоначальной энергии теплой воды и льда. Подобного рода пример является прекрасной иллюстрацией тех проблем, с которыми сталкивается энергозависимое общество: проблема поиска источника энергии с достаточно высокой температурой с тем, чтобы направить какую-то часть этой энергии на выполнение полезной "работы" прежде, чем температура этого источника (или другой энергетический параметр) достигнет такого предела, при котором выполнение полезной "работы" станет невозможным.

## **ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

Приведенный выше пример перемещения человеком предметов, показывает взаимозаменяемость понятий "энергия" и "работа". Так как работа представляет собой произведение силы на расстояние, она измеряется в единицах, называемых в Английской системе мер футо-фунтами (одним из вариантов обозначения единицы "работы" в метрической системе мер является дина-сантиметр). Если человек поднял предмет массой 10 фунтов на высоту 3 фута от уровня пола, потраченная на выполнение этой работы энергия равна 30 футо-фунтам. Предмет теперь обладает потенциальной энергией, равной 30 футо-фунтам, из-за его нахождения на новой высотной отметке, более высокой по сравнению с первоначальной.

В то время как единица футо-фунт используется для измерения механической энергии, эта единица, как правило, не применяется для измерения тепловой энергии. Для измерения тепловой или химической энергии, обычно используется Британская тепловая единица, или Btu (ее аналогом, принятым в метрической системе мер, является калория). 1 Btu - это 1/180 часть энергии, необходимой для нагрева 1 фунта воды от  $32^{\circ}\text{F}$  до  $212^{\circ}\text{F}$ ; так что в среднем для нагрева 1 фунта воды на  $1^{\circ}\text{F}$ , необходима энергия, равная 1 Btu (для повышения темпе-

ратуры 1 г воды на 1°C потребуется одна калория). В одном из опытов, проводимом в начале девятнадцатого столетия, Джоуль нагревал воду в закрытом изолированном сосуде посредством всего лишь механического перемешивания, создавая, тем самым, эквивалентную тепловую энергию для выполнения полезной работы - 778 футо-фунтов/Btu.

Для измерения электрической энергии в Английской системе мер принята единица равная одному киловатт-часу. Так как существует возможность преобразования одной формы энергии в другую, то и единицы измерения также могут быть преобразованы:

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ футо-фунтов} = 0,000293 \text{ кВтч}$$

$$1 \text{ кВтч} = 3413 \text{ Btu} = 2655000 \text{ футо-фунтов}$$

Данные переводные коэффициенты устанавливают равнозначность, которая никак не связана с кпд рабочего процесса. Например, несмотря на то, что 1 Btu эквивалентна 778 футо-фунтам "работы", тепловая энергия фактически не способна выполнить указанный объем полезной работы, поскольку процесс перехода одного вида энергии в другой никогда не происходит со 100 %-ным кпд.

Мощность - это скорость, с которой выполняется работа, или интенсивность, с которой расходуется энергия. Мощность двигателя определяется не суммарной работой, которая должна быть выполнена, а скоростью, с которой данный двигатель может выполнить работу. Мощность парового котла, производящего 100000 фунтов пара в час, в два раза превышает мощность парового котла, производящего 50000 фунтов пара в час. Соотношение между единицами измерения энергии и мощности приведено ниже:

*Единицы измерения энергии*  
 778 футо-фунтов = 1 Btu  
 1 кВтч = 3413 Btu  
 1 лошадиная сила/час = 2545 Btu  
 1 Дж = 0,239 калории

*Единицы измерения мощности*  
 550 футо-фунтов/сек. = 1 л.с.  
 3413 Btu/час = 1 кВт  
 1 кВт = 1,34 л.с.  
 1 л.с. = 0,75 кВт  
 1 килокалории/мин. = 4186 Дж/мин.

Довольно часто приходится сталкиваться с неправильным использованием единиц измерения энергии и мощности; чаще всего встречается ошибка измерения электрической энергии в киловаттах вместо киловатт-часов. Турбина мощностью 10000 кВт не производит какой-либо энергии, если прекращена подача пара, но она продолжает оставаться турбиной мощностью 10000 кВт; однако данный агрегат будет вырабатывать 10000 кВтч электрической энергии (выполнять работу) в те часы, в течение которых дроссельный клапан на паре открыт.

Кпд преобразования энергии в полезную работу может быть чрезвычайно низким. Во многих случаях, либо по причинам ограничений, обусловленных законами физики, либо по причинам экономической целесообразности, поднять такой кпд выше определенного уровня практически невозможно.

При выполнении механической работы, большое количество энергии расходуется на преодоление сил трения: трения качения в подшипниках или торможения, вызванного аэродинамическим сопротивлением. Эффективность процесса сжигания топлива, который представляет собой процесс превращения химической энергии в тепловую, также может быть низкой, что обусловлено определенными трудностями при создании условий для полного сгорания. Однако еще более трудной задачей является преобразование полученной теплоты в механическую работу.

В девятнадцатом веке Карно предложил идеальный цикл, при котором газ при нагревании расширяется и перемещает поршень, преобразуя тепловую энергию в механическую работу. Хотя идеальный двигатель такого рода на практике использовать невозможно, он является примером максимально эф-

фактивного процесса преобразования одного вида энергии в другой. Карно установил, что КПД теплового двигателя, зависит только от абсолютной температуры источника ( $T_s$ ) и приемника ( $T_r$ ). Эту зависимость можно представить в следующем виде:

$$\text{Тепловой КПД} = \frac{T_s - T_r}{T_s} \times 100 \%, \text{ где}$$

$T$  выражена в единицах абсолютной температуры по шкале Ранкина,  $^{\circ}\text{R}$  ( $^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460$ ).

Согласно данному закону, преобразование одного вида энергии в другой со 100 %-ым КПД было бы возможно только в том случае, если выхлопной газ (приемник) был бы полностью лишен какой-либо тепловой энергии (температура равна абсолютному нулю). Однако в практических условиях температура окружающей среды обычного приемника может быть в пределах  $70^{\circ}\text{F}$  ( $530^{\circ}\text{R}$ ), так что 100 %-ный КПД превращения невозможен. Этот факт зафиксирован во втором законе термодинамики: Не вся тепловая энергия, полученная тепловым двигателем в процессе теплового цикла, может быть преобразована в механическую работу.

Для определения теплового КПД при решении практических задач, рассмотрим паровой котел, подающий пар с температурой  $1050^{\circ}\text{F}$  в турбину под давлением  $1000$  фунтов/дюйм<sup>2</sup>. Давление на выпуске турбины в конденсатор составляет  $1$  фунт/дюйм<sup>2</sup> (абс.) (абсолютных фунтов на квадратный дюйм), что соответствует приблизительно  $102^{\circ}\text{F}$ . Максимальный тепловой КПД составляет:

$$\text{КПД} = \frac{(1050 + 460) - 102 + 460}{1050 + 460} \times 100 \% = 63 \%$$

На практике даже самые экономичные паровые турбины, используемые для производства электроэнергии, работают со значительно более низким КПД - примерно 38% для электростанций, работающих на ископаемом топливе, и 32% для электростанций, работающих на ядерном топливе. Это объясняется, прежде всего, наличием потерь в турбине, обусловленных силами трения по поверхностям лопастей турбины, а также потерь, вызванных конденсацией, поэтому КПД наиболее экономичных турбин обычно не превышает 80%. Потери другого рода имеют место в конденсаторе при создании вакуума, а также в генераторе, в процессе преобразования механической энергии в электрическую.

Из формулы определения теплового КПД Карно, видно, что низкие температуры пара или отсутствие конденсатора, приводят к значительному снижению КПД. Этим и объясняется тот факт, что в промышленности очень долго была распространена тенденция использования очень высоких температур и давлений в паровых котлах, с учетом предельных напряжений и напряжений деформации материала сплавов, способных выдерживать подобные нагрузки. Именно по этой причине зашло в тупик развитие парового локомотива, поскольку без конденсатора его двигатель имел  $T_r$   $212^{\circ}\text{F}$  или  $672^{\circ}\text{R}$ .

Значительное влияние на КПД оказывает температура окружающей среды Земного шара (около  $530^{\circ}\text{R}$ ); тепловая энергия с температурой ниже температуры окружающей среды не способна к выполнению работы потому, что самая низкая температура приемника,  $T_r$  (выпуск), ограничивается температурой окружающей среды. Поддержание температуры ниже температуры окружающей среды было бы либо непрактичным, либо экономически нецелесообразным, либо и непрактичным и нецелесообразным одновременно, поскольку это потребовало бы дополнительных затрат энергии, необходимых для выполнения работ по охлаждению, которые бы потребовались для достижения температур ниже температуры окружающей среды.

**СВОЙСТВА ПАРА**

Теоретические рабочие циклы и значения КПД могут быть положены в основу учения об использовании пара в качестве среды для преобразования тепловой энергии в "работу". В большинстве циклов производства электроэнергии с использованием паровых турбин основной рабочей средой является вода (как в паровой, так и в жидкой фазе).

При нагреве воды происходит повышение ее температуры до тех пор, пока она не достигнет температуры кипения (212°F при атмосферном давлении). Достигнув температуры кипения, температура остается постоянной до тех пор, пока вся вода не будет преобразована в пар. Несмотря на то, что требуется всего лишь 1 Btu для повышения температуры на каждый градус до достижения водной температуры кипения, для преобразования в пар 1 фунта воды при температуре 212°F потребуется 970 Btu, что приблизительно в 6 раз превышает ту энергию, которая необходима для нагрева воды от 60 до 212°F.

При повышении давления воды в котле, например, в автоклаве, температура кипения также повышается, в результате чего потребуются больше Btu как для повышения температуры, так и для испарения воды. При более высоком давлении пар, следовательно, имеет и более высокую температуру, а также содержит больше энергии, чем пар при атмосферном давлении. С повышением давления происходит еще одно важное изменение - уменьшается объем.

Таблицы с характеристиками водяного пара были составлены для пояснения взаимосвязи свойств пара и воды при различных значениях температуры и давления. Таблица 46.1 иллюстрирует ту информацию, которая может быть получена из этих таблиц. Хотя подробное обсуждение таблиц с характеристиками водяного пара не входит в объем данного руководства, для более полного понимания процессов производства электрической энергии необходимо изложить некоторые основные моменты этого процесса.

**ЭНТАЛЬПИЯ**

Термин энтальпия означает теплосодержание воды или пара, которое обычно выражено в Btu/фунт. Из таблицы видно, что 32°F, с точки зрения энтальпии, соответствуют нулю, и, следовательно, энтальпия не определяет суммарное содержание энергии. Однако при расчете циклов происходят изменения энтальпии, которые, в свою очередь, могут быть связаны с соответствующими изменениями величины энергии.

Вот простой пример: Сколько энергии потребуется, чтобы повысить температуру воды в теплообменнике с 60° до 120°F при расходе воды 100 гал./мин.? Поскольку 1 фунт воды при 32°F имеет энтальпию, равную нулю, и для повышения температуры на 1 °F требуется 1 Btu, то при температуре 60°F энтальпия составит 60°F - 32°F = 28 Btu/фунт, а 1 фунт воды при температуре 120°F будет иметь энтальпию 120°F - 32°F = 88 Btu/фунт. Поэтому, разность величин энергии воды при указанных температурах будет равна разности величин энтальпии или 88 - 28 = 60 Btu/фунт, что фактически равнозначно разности значений температур. Для определения того, сколько еще энергии потребуется для нагрева воды в приведенном здесь примере, необходимо провести следующие вычисления:

$$60 \text{ Btu/фунт} \times 100 \text{ гал./мин.} \times 8,3 \text{ фунта/гал.} = 49800 \text{ Btu/мин.}$$

Та же самая процедура, но в обратной последовательности, используется для иллюстрации процесса охлаждения. Хотя в данном примере были рассчитаны величины энтальпии воды при 60°F и при 120°F, эти величины могли быть взяты и из таблиц водяного пара: см. пересечение строки "Значение температуры" и колонки "Энтальпия, Насыщенный раствор, h<sub>l</sub>".

На том же самом примере определим количество сконденсировавшегося пара в случае использования пара в качестве источника тепла для нагрева воды в теплообменнике на 60°F. В колонке значений энтальпии для конденсации (или парообразования) при 212°F, мы видим, что для превращения воды в пар требуется 970 Btu/фунт, (в таблице это представлено как  $h_{fg}$  или "изменение энтальпии при переходе жидкости в газообразное состояние"). В колонке значений энтальпии для насыщенного пара ( $h_g$ ), значение 1150 Btu/фунт определяет суммарное теплосодержание пара, но это только теплота конденсации  $h_{fg}$ , которая используется в этом процессе (при условии, что образованный конденсат в дальнейшем не охлаждается, что, фактически, и происходит на самом деле). Так что количество пара, необходимого для этого процесса:

$$49800 \text{ Btu/мин.} \div 970 \text{ Btu/фунт} = 51,3 \text{ фунта/мин.}$$

## **СВОЙСТВА ПАРА**

---

Термины "насыщенный", "сухой" и "сырой" часто используются для характеристики пара. Термин "насыщенный пар", указанный в таблицах, соответствует термину "сухой и насыщенный пар". Другими словами, это пар, находящийся в термодинамическом равновесии с водой при температуре кипения, не содержащий какой-либо жидкости. Пар, который содержит капли воды, называется "влажным паром". Пар, выходящий из носика чайника на кухонной плите, не имеет цвета, т.е. является невидимым только в непосредственной близости от носика чайника; это – сухой насыщенный пар. Однако, если отойти подальше от носика чайника, то можно заметить, что пар становится белым, потому что часть пара уже потеряла тепловую энергию и сконденсировалась в виде крошечных капелек воды; это, так называемый, "облачный (мутный) пар", который уже содержит меньшее количество тепловой энергии на фунт и называется "влажным паром".

Влажный пар всегда обладает меньшим количеством теплоты на единицу массы (фунт) по сравнению с сухим паром; следовательно, он выполняет меньше работы. Термин "качество" часто используется для обозначения степени сухости пара: пар 100 %-ного качества означает "сухой" пар, а если качество пара определяется как 90 %, то это означает, что пар содержит 10 масс. % влаги. Свойства сухого пара показаны в Таблицах 46.1 и 46.2.

После испарения пар может получить дополнительную теплоту, в результате чего повысится его температура и энергосодержание; такой пар называется "перегретым паром". Перегревание не только увеличивает содержащуюся в паре энергию, но и позволяет передавать пар по трубопроводам при более низком образовании конденсата. Конденсация уменьшает КПД тепловых двигателей и является причиной тепловых потерь и возникновения гидравлического удара в паропроводах. Свойства перегретого пара показаны в Таблице 46.3.

## **РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА И КПД ПАРОВЫХ КОТЛОВ**

---

Для каждого вида топлива характерно определенное содержание энергии (теплотворная способность) (Таблица 46.4).

При сжигании любого топлива происходят значительные потери энергии на более низком энергетическом уровне - в атмосфере - что в данном случае делает эту энергию непригодной для использования. Большая часть таких тепловых потерь содержится в дымовых газах, выходящих из печи. Чем ниже температура отработанного газа, тем выше будет КПД. Так как в промышленности топливо в большинстве случаев сжигают для производства пара, следовательно, во всех странах с развитой промышленностью КПД разнообразных паровых котлов имеет очень важное значение.

## ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

**Таблица 46.4** Теплотворная способность топлива

Топливо	Теплотворная способность
Каменный уголь	12000-14000 Вт/фунт (6700-7800 ккал/кг)
Мазут №6	18000-19000 Вт/фунт (10000-10500 ккал/кг) (приблизительно 150000 Вт/гал) (10 × 106 ккал/кубич. м)
Природный газ	1000-1200 Вт/кубич. Фут (8900-10700 ккал/кубич. м).

Без использования специального оборудования для рекуперации тепла, КПД самого парового котла находится в пределах от 65 до 80 % (Таблица 46.5). КПД очень мощных паровых котлов со сложными экономайзерами и калориферами в отдельных случаях может достигать даже 90%, однако применение вспомогательного оборудования такого типа обычно ограничивается только паровыми котлами высокого давления, используемыми на электростанциях общего пользования. В паровом котле, рассчитанном на давление 1000 фунтов/кв. дюйм (69 бар), температура воды составляет приблизительно 550°F (288°C). Если предположить, что для формирования движущей силы, необходимой для протекания процесса теплопередачи, разность температур между рабочим газом печи и температурой воды в паровом котле составляет примерно 400°F (204°C), то при этих условиях температура выходящих газов должна быть 950°F (510°C).

Включение в конструкцию данного котла экономайзера (для нагрева питательной воды, подаваемой в котел) и нагревателя воздуха (для нагрева воздуха поступающего в камеру сгорания), вероятно привело бы к снижению температуры отходящих газов до 400°F (204°C) и позволило бы увеличить КПД на 12 - 13 %. Общая площадь поверхности этих устройств для рекуперации тепла может вдвое превосходить площадь поверхности нагрева самого котла!

Схема включения экономайзера в комплектную поставку парового котла низкого давления показана на рис. 46.1. Такой экономайзер может быть установлен в процессе монтажа котла или позже в качестве добавочного блока. В подобных случаях иногда применяется эмпирическое правило, согласно которому, увеличение КПД котла на каждый 1% может быть достигнуто при каждом понижении температуры дымовых газов на 40°F, что может быть достигнуто с помощью экономайзера.

Другая причина потеря энергии и соответствующего снижения КПД заключается в подаче избыточного воздуха сверх того количества, которое необходимо для процесса сжигания. Процесс сжигания топлива в паровом котле практически невозможен при использовании только теоретически рассчитанного объема воздуха. Избыточное количество воздуха, (выше теоретически определенного значения), всегда обеспечивается для того, чтобы движущая сила, создаваемая избыточным кислородом, гарантировала бы полное и эффективное сгорание топлива в печи. Однако избыточный воздух поглощает энергию топлива, поскольку он должен быть нагрет до температуры остальных печных газов. Таким образом тепловая энергия, полученная за счет избыточного воздуха, становится еще одной причиной потери энергии (увеличение энергии, при ее одновременном понижении) в отходящем дымовом газе.

### **ПОВЫШЕНИЕ КПД ПАРОВОГО КОТЛА**

Паровой котел с производительностью 100000 фунтов пара в час (45400 кг/час), при давлении 600 фунт на квадратный дюйм (41,4 бар) и температуре 900°F (482°C) (перегретый пар), производит пар с энтальпией 1461 Вт/фунт (812 ккал/кг) (См. таблицу 46.3). Выходная мощность (электрическая) этого парового котла составит 100000 фунтов/час × 1461 Вт/фунт = 146 × 10<sup>6</sup> Вт/час (45400 кг/час × 810 ккал/кг = 36,9 × 10<sup>6</sup> ккал/час).

ТАБЛИЦА 46.1 Насыщенный пар: Таблица значений температур (с 32 до 705,47°F)

Абсолютное		Удельный объем				Энтальпия				Энтропия				
Температура, (град. по Фаренгейту)	p (фунт на кв. дюйм)	Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Температура, (град. по Фаренгейту)
		жидкость,	пар,	жидкость,	пар,	жидкость,	пар,	жидкость,	пар,	жидкость,	пар,			
t	P	vf	vfg	vg	hg	hf	hfg	hg	sf	sfg	sg	t		
32.0*	0.08959	0.016022	3304.7	3304.7	-0.01179	1075.5	1075.5	1075.5	0.0000	2.1873	2.1873	32.0*		
34.0	0.09500	0.016021	3061.9	3061.9	1.996	1074.4	1076.4	1076.4	0.0041	2.1762	2.1802	34.0		
36.0	0.10395	0.016020	2839.0	2839.0	4.008	1073.2	1077.2	1077.2	0.0081	2.1651	2.1732	36.0		
38.0	0.11249	0.016019	2634.1	2634.2	6.018	1072.1	1078.1	1078.1	0.0122	2.1541	2.1663	38.0		
40.0	0.12163	0.016019	2445.8	2445.8	8.027	1071.0	1079.0	1079.0	0.0162	2.1432	2.1594	40.0		
42.0	0.13143	0.016019	2272.4	2272.4	10.035	1069.8	1079.9	1079.9	0.0202	2.1325	2.1527	42.0		
44.0	0.14192	0.016019	2112.8	2112.8	12.041	1068.7	1080.7	1080.7	0.0242	2.1217	2.1459	44.0		
46.0	0.15314	0.016020	1965.7	1965.7	14.047	1067.6	1081.6	1081.6	0.0282	2.1111	2.1393	46.0		
48.0	0.16514	0.016021	1830.0	1830.0	16.051	1066.4	1082.5	1082.5	0.0321	2.1006	2.1327	48.0		
50.0	0.17796	0.016023	1704.8	1704.8	18.054	1065.3	1083.4	1083.4	0.0361	2.0901	2.1262	50.0		
52.0	0.19165	0.016024	1589.2	1589.2	20.057	1064.2	1084.2	1084.2	0.0400	2.0798	2.1197	52.0		
54.0	0.20625	0.016026	1482.4	1482.4	22.058	1063.1	1085.1	1085.1	0.0439	2.0695	2.1134	54.0		
56.0	0.22183	0.016028	1383.6	1383.6	24.059	1061.9	1086.0	1086.0	0.0478	2.0593	2.1070	56.0		
58.0	0.23843	0.016031	1292.2	1292.2	26.060	1060.8	1086.9	1086.9	0.0516	2.0491	2.1008	58.0		
60.0	0.25611	0.016033	1207.6	1207.6	28.060	1059.7	1087.7	1087.7	0.0555	2.0391	2.0946	60.0		
62.0	0.27494	0.016036	1129.2	1129.2	30.059	1058.5	1088.6	1088.6	0.0593	2.0291	2.0895	62.0		
64.0	0.29497	0.016039	1056.5	1056.5	32.058	1057.4	1089.5	1089.5	0.0632	2.0192	2.0844	64.0		
66.0	0.31626	0.016043	989.1	989.1	34.056	1056.3	1090.4	1090.4	0.0670	2.0094	2.0794	66.0		
68.0	0.33889	0.016046	926.5	926.5	36.054	1055.2	1091.2	1091.2	0.0708	2.0000	2.0744	68.0		
70.0	0.36292	0.016050	868.3	868.4	38.052	1054.0	1092.1	1092.1	0.0745	1.9900	2.0695	70.0		
72.0	0.38844	0.016054	814.3	814.3	40.049	1052.9	1093.0	1093.0	0.0783	1.9804	2.0657	72.0		
74.0	0.41550	0.016058	764.1	764.1	42.046	1051.8	1093.8	1093.8	0.0821	1.9708	2.0620	74.0		
76.0	0.44420	0.016063	717.4	717.4	44.043	1050.7	1094.7	1094.7	0.0858	1.9614	2.0472	76.0		
78.0	0.47461	0.016067	673.8	673.9	46.040	1049.5	1095.6	1095.6	0.0895	1.9520	2.0415	78.0		
80.0	0.50683	0.016072	633.3	633.3	48.037	1048.4	1096.4	1096.4	0.0932	1.9426	2.0359	80.0		
82.0	0.54093	0.016077	595.5	595.5	50.033	1047.3	1097.3	1097.3	0.0969	1.9334	2.0303	82.0		
84.0	0.57702	0.016082	560.3	560.3	52.029	1046.1	1098.2	1098.2	0.1006	1.9241	2.0248	84.0		
86.0	0.61516	0.016087	527.6	527.6	54.025	1045.0	1099.0	1099.0	0.1044	1.9149	2.0193	86.0		
88.0	0.65551	0.016093	496.8	496.8	56.022	1043.9	1099.9	1099.9	0.1079	1.9060	2.0139	88.0		
90.0	0.69813	0.016099	468.1	468.1	58.018	1042.7	1100.8	1100.8	0.1115	1.8970	2.0086	90.0		
92.0	0.74313	0.016105	441.3	441.3	60.014	1041.6	1101.6	1101.6	0.1152	1.8881	2.0033	92.0		
94.0	0.79062	0.016111	416.3	416.3	62.010	1040.5	1102.5	1102.5	0.1188	1.8792	1.9980	94.0		
96.0	0.84072	0.016117	392.8	392.9	64.006	1039.3	1103.3	1103.3	0.1224	1.8704	1.9928	96.0		
98.0	0.89356	0.016123	370.9	370.9	66.003	1038.2	1104.2	1104.2	0.1260	1.8617	1.9876	98.0		

106,6	0,94924	0,016130	350,4	350,4	67,999	1037,1	1105,1	0,1295	1,8530	1,9825	106,8
107,0	1,00789	0,016137	331,1	331,1	69,995	1035,9	1105,9	0,1331	1,8444	1,9775	107,2
108,0	1,06965	0,016144	313,1	313,1	71,992	1034,8	1106,0	0,1366	1,8358	1,9725	108,2
109,0	1,1347	0,016151	296,16	296,16	73,999	1033,6	1107,6	0,1402	1,8273	1,9675	109,2
110,0	1,2030	0,016158	280,30	280,30	75,998	1032,5	1108,5	0,1437	1,8188	1,9626	110,2
111,0	1,2750	0,016165	265,39	265,39	77,998	1031,4	1109,3	0,1472	1,8105	1,9577	111,2
112,0	1,3506	0,016173	251,37	251,37	79,998	1030,2	1110,2	0,1507	1,8021	1,9527	112,2
113,0	1,4298	0,016180	238,21	238,21	81,97	1029,1	1111,0	0,1542	1,7938	1,9480	113,2
114,0	1,5133	0,016186	225,94	225,94	83,97	1027,9	1111,9	0,1577	1,7856	1,9433	114,2
115,0	1,6009	0,016196	214,20	214,20	85,97	1026,8	1112,7	0,1611	1,7774	1,9386	115,2
116,0	1,6927	0,016204	203,25	203,25	87,97	1025,6	1113,6	0,1646	1,7693	1,9339	116,2
117,0	1,7891	0,016213	192,94	192,94	89,96	1024,5	1114,4	0,1680	1,7613	1,9293	117,2
118,0	1,8901	0,016221	183,24	183,24	91,96	1023,3	1115,3	0,1715	1,7533	1,9247	118,2
119,0	1,9959	0,016229	174,08	174,08	93,96	1022,2	1116,1	0,1749	1,7453	1,9202	119,2
120,0	2,1068	0,016238	165,45	165,45	95,96	1021,0	1117,0	0,1783	1,7374	1,9157	120,2
130,0	2,2230	0,016247	157,32	157,32	97,96	1019,8	1117,8	0,1817	1,7295	1,9112	130,2
131,0	2,3445	0,016256	149,64	149,64	99,95	1018,7	1118,6	0,1851	1,7217	1,9068	131,2
132,0	2,4717	0,016265	142,40	142,40	101,95	1017,5	1119,5	0,1884	1,7140	1,9024	132,2
133,0	2,6047	0,016274	135,55	135,55	103,95	1016,4	1120,3	0,1918	1,7063	1,8980	133,2
134,0	2,7438	0,016284	129,09	129,11	105,95	1015,2	1121,1	0,1951	1,6986	1,8937	134,2
140,0	2,8932	0,016293	122,98	123,00	107,95	1014,0	1122,0	0,1985	1,6910	1,8895	140,2
141,0	3,0491	0,016303	117,21	117,22	109,95	1012,9	1122,8	0,2018	1,6834	1,8852	141,2
142,0	3,2107	0,016312	111,74	111,76	111,95	1011,7	1123,6	0,2051	1,6759	1,8810	142,2
143,0	3,3783	0,016322	106,59	106,59	113,95	1010,5	1124,5	0,2084	1,6684	1,8769	143,2
144,0	3,5581	0,016332	101,68	101,70	115,95	1009,3	1125,3	0,2117	1,6610	1,8727	144,2
150,0	3,7184	0,016343	97,05	97,07	117,95	1008,2	1126,1	0,2150	1,6536	1,8686	150,2
151,0	3,9065	0,016353	92,66	92,68	119,95	1007,0	1126,9	0,2183	1,6463	1,8646	151,2
152,0	4,1025	0,016363	88,50	88,52	121,95	1005,8	1127,7	0,2216	1,6390	1,8606	152,2
153,0	4,3068	0,016374	84,56	84,57	123,95	1004,6	1128,5	0,2248	1,6318	1,8566	153,2
154,0	4,5197	0,016384	80,82	80,83	125,96	1003,4	1129,4	0,2281	1,6245	1,8526	154,2
160,0	4,7414	0,016395	77,27	77,29	127,96	1002,2	1130,2	0,2313	1,6174	1,8487	160,2
161,0	4,9722	0,016406	73,90	73,92	129,96	1001,0	1131,0	0,2345	1,6103	1,8448	161,2
162,0	5,2124	0,016417	70,70	70,72	131,96	999,8	1131,8	0,2377	1,6032	1,8409	162,2
163,0	5,4623	0,016428	67,67	67,68	133,97	998,6	1132,6	0,2409	1,5961	1,8371	163,2
164,0	5,7223	0,016440	64,78	64,80	135,97	997,4	1133,4	0,2441	1,5892	1,8333	164,2
170,0	5,9926	0,016451	62,04	62,06	137,97	996,2	1134,2	0,2473	1,5822	1,8295	170,2
171,0	6,2736	0,016463	59,43	59,45	139,98	995,0	1135,0	0,2505	1,5753	1,8258	171,2
172,0	6,5656	0,016474	56,95	56,97	141,98	993,8	1135,8	0,2537	1,5684	1,8221	172,2
173,0	6,8690	0,016486	54,59	54,61	143,99	992,6	1136,6	0,2568	1,5616	1,8184	173,2
174,0	7,1840	0,016498	52,35	52,36	145,99	991,4	1137,4	0,2600	1,5548	1,8147	174,2

\*Представленные в таблице состояния являются метастабильными

**ТАБЛИЦА 46.1** Насыщенный пар. Таблица значений температур (с 32 до 705,47°F) (Продолжение)

Абсолютное		Удельный объем				Энтальпия				Энтропия				
Температура, Фаренгейту)	давление, (фунт на кв. дюйм)	Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Насыщен-		Температура, (град. по Фаренгейту)
		жидкость,	пар,	жидкость,	пар,	жидкость,	пар,	жидкость,	пар,	жидкость,	пар,			
t	p	vf	vg	hf	hg	sf	sg	sf	sg	sf	sg	sf	sg	t
100.0	7.5110	0.016510	50.71	148.00	990.2	1138.2	186.0	0.2631	1.5480	1.8111	186.0			
120.0	7.6650	0.016522	48.77	150.01	989.0	1139.0	187.0	0.2662	1.5413	1.8075	187.0			
140.0	8.2000	0.016532	46.77	152.01	987.8	1139.8	188.0	0.2694	1.5346	1.8040	188.0			
160.0	8.7350	0.016544	44.80	154.02	986.5	1140.5	189.0	0.2725	1.5279	1.8004	189.0			
180.0	8.9437	0.016559	42.62	156.03	985.3	1141.3	190.0	0.2756	1.5213	1.7969	190.0			
190.0	9.340	0.016572	40.94	158.05	984.1	1142.1	191.0	0.2787	1.5148	1.7934	191.0			
200.0	9.747	0.016585	39.33	160.06	982.8	1142.9	192.0	0.2818	1.5082	1.7900	192.0			
210.0	10.168	0.016598	37.80	162.05	981.6	1143.7	193.0	0.2848	1.5017	1.7865	193.0			
220.0	10.605	0.016611	36.34	164.06	980.4	1144.4	194.0	0.2879	1.4952	1.7831	194.0			
230.0	11.058	0.016624	34.97	166.08	979.1	1145.2	195.0	0.2910	1.4888	1.7798	195.0			
240.0	11.526	0.016637	33.63	168.09	977.9	1146.0	200.0	0.2940	1.4824	1.7764	200.0			
250.0	12.012	0.016654	31.15	172.11	975.4	1147.5	200.0	0.3001	1.4697	1.7698	200.0			
260.0	13.568	0.016691	28.87	176.14	972.8	1149.0	200.0	0.3061	1.4571	1.7632	200.0			
270.0	14.696	0.016719	26.78	180.17	970.3	1150.5	210.0	0.3121	1.4444	1.7566	210.0			
280.0	15.901	0.016747	24.87	184.20	967.8	1152.0	210.0	0.3181	1.4323	1.7505	210.0			
290.0	17.186	0.016775	23.13	188.23	965.2	1153.4	220.0	0.3241	1.4201	1.7442	220.0			
300.0	18.556	0.016805	21.54	192.27	962.6	1154.9	220.0	0.3300	1.4081	1.7380	220.0			
310.0	20.015	0.016834	20.05	196.31	960.0	1156.3	230.0	0.3359	1.3961	1.7320	230.0			
320.0	21.567	0.016864	18.71	200.35	957.4	1157.8	230.0	0.3417	1.3842	1.7260	230.0			
330.0	23.216	0.016895	17.45	204.40	954.8	1159.2	240.0	0.3476	1.3725	1.7201	240.0			
340.0	24.968	0.016926	16.30	208.45	952.1	1160.6	240.0	0.3533	1.3609	1.7142	240.0			
350.0	26.826	0.016958	15.23	212.50	949.5	1162.0	240.0	0.3591	1.3494	1.7085	240.0			
360.0	28.796	0.016990	14.26	216.56	946.8	1163.4	250.0	0.3649	1.3379	1.7028	250.0			
370.0	30.883	0.017022	13.38	220.62	944.1	1164.7	250.0	0.3706	1.3266	1.6972	250.0			
380.0	33.091	0.017055	12.52	224.69	941.4	1166.1	250.0	0.3763	1.3154	1.6917	250.0			
390.0	35.427	0.017089	11.745	228.76	938.6	1167.4	260.0	0.3819	1.3043	1.6862	260.0			
400.0	37.894	0.017123	11.025	232.83	935.9	1168.7	260.0	0.3876	1.2933	1.6808	260.0			
410.0	40.500	0.017157	10.358	236.91	933.1	1170.0	260.0	0.3932	1.2823	1.6755	260.0			
420.0	43.249	0.017193	9.738	240.99	930.3	1171.3	270.0	0.3987	1.2715	1.6702	270.0			
430.0	46.147	0.017228	9.162	245.08	927.5	1172.5	270.0	0.4043	1.2607	1.6650	270.0			
440.0	49.200	0.017264	8.627	249.17	924.6	1173.8	280.0	0.4098	1.2501	1.6599	280.0			
450.0	52.414	0.017300	8.1280	253.25	921.6	1175.0	280.0	0.4154	1.2395	1.6548	280.0			
460.0	55.785	0.017338	7.6594	257.34	918.6	1176.2	280.0	0.4208	1.2290	1.6498	280.0			
470.0	59.318	0.017378	7.2175	261.43	915.5	1177.4	290.0	0.4263	1.2186	1.6449	290.0			
480.0	63.084	0.017417	6.8033	265.56	912.3	1178.6	290.0	0.4317	1.2082	1.6400	290.0			

ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

384,8	67,005	0,01745	6,4483	6,4658	269,7	91,00	11,797	0,4372	1,1079	1,6351	388,0
384,8	71,119	0,01749	6,0955	6,1130	273,8	907,0	11,809	0,4476	1,1877	1,6393	388,0
384,8	75,433	0,01753	5,7655	5,7830	278,0	904,0	11,820	0,4479	1,1776	1,6265	388,0
316,8	79,953	0,01757	5,4566	5,4742	282,1	901,0	11,831	0,4533	1,1676	1,6209	316,8
316,8	84,688	0,01761	5,1673	5,1849	286,3	897,9	11,841	0,4586	1,1576	1,6162	316,8
374,0	89,643	0,01766	4,8961	4,9138	290,4	894,8	11,852	0,4640	1,1477	1,6116	374,0
374,0	94,826	0,01770	4,6418	4,6595	294,6	891,6	11,862	0,4692	1,1378	1,6071	374,0
374,0	100,245	0,01774	4,4030	4,4208	298,7	888,5	11,872	0,4745	1,1280	1,6025	374,0
374,0	105,907	0,01779	4,1788	4,1966	302,9	885,3	11,882	0,4798	1,1183	1,5981	374,0
336,8	111,820	0,01783	3,9681	3,9859	307,1	882,1	11,891	0,4850	1,1086	1,5936	336,8
344,0	117,992	0,01787	3,7699	3,7878	311,3	878,8	11,901	0,4902	1,0990	1,5892	344,0
344,0	124,430	0,01792	3,5834	3,6013	315,5	875,5	11,910	0,4954	1,0894	1,5849	344,0
344,0	131,142	0,01797	3,4078	3,4258	319,7	872,2	11,911	0,5006	1,0799	1,5806	344,0
352,8	138,138	0,01801	3,2423	3,2603	323,9	868,9	11,927	0,5058	1,0705	1,5763	352,8
352,8	145,424	0,01806	3,0863	3,1044	328,1	865,5	11,936	0,5110	1,0611	1,5721	352,8
360,8	153,010	0,01811	2,9392	2,9573	332,3	862,1	11,944	0,5161	1,0517	1,5678	360,8
360,8	160,903	0,01816	2,8002	2,8184	336,5	858,6	11,952	0,5212	1,0424	1,5637	360,8
360,8	169,113	0,01821	2,6691	2,6873	340,8	855,1	11,959	0,5263	1,0332	1,5595	360,8
372,8	177,648	0,01826	2,5451	2,5633	345,0	851,6	11,967	0,5314	1,0240	1,5554	372,8
372,8	186,517	0,01831	2,4279	2,4462	349,3	848,1	11,974	0,5365	1,0148	1,5513	372,8
380,8	195,729	0,01836	2,3170	2,3353	353,6	844,5	11,980	0,5416	1,0057	1,5473	380,8
380,8	205,294	0,01842	2,2120	2,2304	357,9	840,8	11,987	0,5466	0,9966	1,5432	380,8
380,8	215,270	0,01847	2,1126	2,1311	362,2	837,2	11,993	0,5516	0,9876	1,5392	380,8
392,8	225,516	0,01853	2,0184	2,0369	366,5	833,4	11,999	0,5567	0,9786	1,5352	392,8
392,8	236,193	0,01858	1,9291	1,9477	370,8	829,7	12,004	0,5617	0,9696	1,5313	392,8
400,8	247,259	0,01864	1,8444	1,8630	375,1	825,9	12,010	0,5667	0,9607	1,5274	400,8
400,8	258,725	0,01870	1,7640	1,7827	379,4	822,0	12,015	0,5717	0,9518	1,5234	400,8
400,8	270,600	0,01875	1,6877	1,7064	383,8	818,2	12,019	0,5766	0,9429	1,5195	400,8
412,8	282,894	0,01881	1,6152	1,6340	388,1	814,2	12,024	0,5816	0,9341	1,5157	412,8
412,8	295,617	0,01887	1,5463	1,5651	392,5	810,2	12,028	0,5866	0,9253	1,5118	412,8
420,8	308,780	0,01894	1,4808	1,4997	396,9	806,2	12,031	0,5915	0,9165	1,5080	420,8
420,8	322,391	0,01900	1,4184	1,4374	401,3	802,2	12,035	0,5964	0,9077	1,5042	420,8
432,8	336,463	0,01906	1,3591	1,3782	405,7	798,0	12,037	0,6014	0,8990	1,5004	432,8
432,8	350,403	0,01913	1,3026	1,32179	410,1	793,9	12,040	0,6063	0,8903	1,4966	432,8
432,8	366,03	0,01919	1,24887	1,26806	414,6	789,7	12,042	0,6112	0,8816	1,4928	432,8
440,8	381,54	0,01926	1,19761	1,21687	419,0	785,4	12,044	0,6161	0,8729	1,4890	440,8
440,8	397,56	0,01933	1,14874	1,16806	423,5	781,1	12,045	0,6210	0,8643	1,4853	440,8
440,8	414,09	0,01940	1,10212	1,12152	428,0	776,7	12,046	0,6258	0,8557	1,4815	440,8
452,8	431,14	0,01947	1,05764	1,07711	432,5	772,3	12,046	0,6306	0,8471	1,4778	452,8
452,8	448,73	0,01954	1,01518	1,03472	437,0	767,8	12,048	0,6356	0,8385	1,4741	452,8

ТАБЛИЦА 46.1 Насыщенный пар: Таблица значений температур (с 32 до 705,47°F) (Продолжение)

Температура, (град. по Фаренгейту)	Абсолютное давление, (фунт на кв. дюйм)		Удельный объем		Энтальпия		Энтропия		Температура, (град. по Фаренгейту)		
	р	в	нажкость, наж.	пар, пар.	нажкость, наж.	пар, пар.	нажкость, наж.	пар, пар.			
464.8	466.87	0.01961	0.97463	0.99424	441.5	763.2	1204.8	0.6405	0.8299	1.4704	464.8
464.8	485.56	0.01969	0.93588	0.95557	446.1	758.6	1204.7	0.6454	0.8213	1.4667	464.8
464.8	504.83	0.01976	0.89885	0.91862	450.7	754.0	1204.6	0.6502	0.8127	1.4629	464.8
474.8	524.67	0.01984	0.86345	0.88329	455.2	749.3	1204.5	0.6551	0.8042	1.4592	474.8
474.8	545.11	0.01992	0.82958	0.84950	459.9	744.5	1204.3	0.6599	0.7956	1.4555	474.8
484.8	566.15	0.02000	0.79716	0.81717	464.5	739.6	1204.1	0.6648	0.7871	1.4518	484.8
484.8	587.81	0.02009	0.76613	0.78622	469.1	734.7	1203.8	0.6696	0.7785	1.4481	484.8
484.8	610.10	0.02017	0.73641	0.75658	473.8	729.7	1203.5	0.6745	0.7700	1.4444	484.8
484.8	633.03	0.02026	0.70794	0.72820	478.5	724.6	1203.1	0.6793	0.7614	1.4407	484.8
484.8	656.61	0.02034	0.68065	0.70100	483.2	719.5	1202.7	0.6842	0.7528	1.4370	484.8
504.8	680.95	0.02043	0.65448	0.67492	487.9	714.3	1202.2	0.6890	0.7443	1.4333	504.8
504.8	705.98	0.02053	0.62938	0.64991	492.7	709.0	1201.7	0.6939	0.7357	1.4296	504.8
504.8	731.40	0.02062	0.60518	0.62592	497.5	703.7	1201.1	0.6987	0.7271	1.4258	504.8
512.8	757.72	0.02072	0.58198	0.60269	502.3	698.2	1200.5	0.7036	0.7185	1.4221	512.8
512.8	784.76	0.02081	0.55997	0.58079	507.1	692.7	1199.8	0.7085	0.7099	1.4183	512.8
524.8	812.53	0.02091	0.53864	0.55956	512.0	687.0	1199.0	0.7133	0.7013	1.4146	524.8
524.8	841.04	0.02102	0.51814	0.53915	516.9	681.3	1198.2	0.7182	0.6926	1.4108	524.8
524.8	870.31	0.02112	0.49843	0.51965	521.8	675.5	1197.5	0.7231	0.6839	1.4070	524.8
532.0	900.34	0.02123	0.47947	0.50070	526.8	669.8	1196.4	0.7280	0.6752	1.4032	532.0
536.0	931.17	0.02134	0.46123	0.48257	531.7	663.6	1195.4	0.7329	0.6665	1.3993	536.0
548.0	962.79	0.02146	0.44367	0.46513	536.8	657.5	1194.3	0.7378	0.6577	1.3954	548.0
544.0	995.22	0.02157	0.42677	0.44834	541.8	651.3	1193.1	0.7427	0.6489	1.3915	544.0
548.0	1028.49	0.02169	0.41048	0.43217	546.9	645.0	1191.9	0.7476	0.6400	1.3876	548.0
552.0	1062.59	0.02182	0.39479	0.41660	552.0	638.5	1190.6	0.7525	0.6311	1.3837	552.0
556.0	1097.55	0.02194	0.37966	0.40160	557.2	632.0	1189.2	0.7575	0.6222	1.3797	556.0
568.0	1133.38	0.02207	0.36507	0.38714	562.4	625.3	1187.7	0.7625	0.6132	1.3757	568.0
564.0	1170.12	0.02221	0.35099	0.37320	567.6	618.5	1186.1	0.7674	0.6041	1.3716	564.0
568.0	1207.72	0.02235	0.33741	0.35975	572.9	611.5	1184.5	0.7725	0.5950	1.3675	568.0
572.0	1246.26	0.02249	0.32429	0.34678	578.3	604.5	1182.7	0.7775	0.5859	1.3634	572.0
576.0	1285.74	0.02264	0.31162	0.33426	583.7	597.2	1180.9	0.7825	0.5766	1.3592	576.0
588.0	1326.17	0.02279	0.29937	0.32216	589.1	589.9	1179.0	0.7876	0.5673	1.3550	588.0
584.0	1367.7	0.02295	0.28753	0.31048	594.6	582.4	1176.9	0.7927	0.5580	1.3507	584.0
588.0	1410.0	0.02311	0.27608	0.29919	600.1	574.7	1174.8	0.7978	0.5485	1.3464	588.0
582.0	1453.3	0.02328	0.26499	0.28827	605.7	566.8	1172.6	0.8030	0.5390	1.3420	582.0
588.0	1497.8	0.02348	0.25425	0.27770	611.4	558.8	1170.2	0.8082	0.5293	1.3375	588.0

598.0	1543.2	0.02364	0.24384	0.26747	617.1	506.6	1167.7	0.8194	0.5196	1.3330	598.0
599.0	1599.7	0.02382	0.24374	0.27157	629.3	512.2	1165.1	0.8167	0.5097	1.3284	599.0
600.0	1637.3	0.02400	0.24364	0.29636	639.8	519.5	1162.4	0.8240	0.4997	1.3238	600.0
612.0	1686.6	0.02422	0.24442	0.29865	640.8	515.6	1156.3	0.8294	0.4896	1.3190	612.0
616.0	1735.9	0.02444	0.20516	0.22960	640.8	515.6	1156.3	0.8348	0.4794	1.3141	616.0
628.0	1786.9	0.02466	0.19615	0.22081	646.9	506.3	1153.2	0.8403	0.4693	1.3092	628.0
629.0	1839.0	0.02489	0.18737	0.21276	653.1	496.6	1149.8	0.8458	0.4593	1.3041	629.0
630.0	1892.4	0.02514	0.17880	0.20394	659.5	487.1	1146.1	0.8511	0.4493	1.2988	630.0
632.0	1947.0	0.02539	0.17044	0.19563	666.0	478.4	1142.2	0.8571	0.4394	1.2934	632.0
636.0	2002.8	0.02566	0.16226	0.18792	672.4	469.7	1138.1	0.8628	0.4291	1.2879	636.0
648.0	2059.9	0.02595	0.15427	0.18021	679.1	461.0	1133.7	0.8686	0.4184	1.2821	648.0
649.0	2118.3	0.02625	0.14644	0.17269	685.9	443.1	1129.0	0.8746	0.4075	1.2761	649.0
648.0	2178.1	0.02657	0.13876	0.16534	692.9	431.1	1124.0	0.8806	0.3963	1.2699	648.0
652.0	2239.2	0.02691	0.13124	0.15816	700.0	418.7	1118.7	0.8868	0.3847	1.2634	652.0
656.0	2301.7	0.02728	0.12387	0.15115	707.4	406.7	1113.1	0.8931	0.3727	1.2567	656.0
668.0	2365.7	0.02768	0.11663	0.14431	714.9	392.1	1107.0	0.8995	0.3602	1.2498	668.0
669.0	2431.1	0.02811	0.10947	0.13757	722.9	377.7	1100.6	0.9064	0.3461	1.2425	669.0
668.0	2498.1	0.02858	0.10279	0.13087	731.5	362.1	1093.5	0.9137	0.3310	1.2347	668.0
672.0	2566.6	0.02911	0.09614	0.12424	740.2	347.7	1085.9	0.9212	0.3154	1.2266	672.0
676.0	2636.8	0.02970	0.08979	0.11769	749.2	328.5	1077.6	0.9287	0.2992	1.2179	676.0
688.0	2708.6	0.03037	0.08080	0.11117	758.5	310.1	1068.5	0.9365	0.2720	1.2086	688.0
689.0	2782.1	0.03114	0.07349	0.10463	768.2	290.2	1058.4	0.9447	0.2537	1.1984	689.0
688.0	2857.4	0.03204	0.06695	0.09799	778.8	268.2	1047.0	0.9535	0.2337	1.1872	688.0
692.0	2934.5	0.03313	0.05797	0.09110	790.5	243.1	1033.6	0.9634	0.2110	1.1744	692.0
696.0	3013.4	0.03455	0.04916	0.08371	804.4	212.8	1017.2	0.9749	0.1841	1.1591	696.0
708.0	3094.3	0.03662	0.03857	0.07519	822.4	172.7	995.2	0.9901	0.1490	1.1390	708.0
709.0	3135.5	0.03824	0.03173	0.06697	835.0	144.7	979.7	1.0006	0.1246	1.1252	709.0
708.0	3177.2	0.04108	0.02192	0.06300	852.0	102.0	956.2	1.0169	0.0876	1.1046	708.0
709.0	3198.3	0.04427	0.01304	0.05730	874.0	61.4	934.4	1.0329	0.0527	1.0856	709.0
708.0	3208.2	0.05078	0.00000	0.05078	906.0	0.0	906.0	1.0612	0.0000	1.0612	708.0*

\* Критическая температура

Источник: Компания Combustion Engineering, Inc.

**ТАБЛИЦА 46.2** Насыщенный пар: Таблица значений давления (0,08865 до 3208,2 фунт на кв. дюйм)

Абсолютное давление, (фунт на кв. дюйм)			Удельный объем			Энтальпия			Энтропия			
Температура, (град. по Фаренгейту)	p	ρ	Насыщен- ный пар,		v <sub>g</sub>	Насыщен- ная жидкость,		h <sub>fg</sub>	Насыщен- ная жидкость,		s <sub>fg</sub>	Температура, (град. по Фаренгейту)
			насыщен- ный пар,	насыщен- ная жидкость,		насыщен- ная жидкость,	насыщен- ная жидкость,					
t	0.08865	3208.2	v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>g</sub>	t		
20.0	27.96	0.016834	20.070	20.087	196.27	96.01	1156.3	0.0000	2.1872	20.0		
30.0	29.36	0.017009	13.7436	4.4310	218.9	945.2	1164.1	0.0542	2.0967	30.0		
40.0	29.75	0.017151	10.4965	4.0306	236.1	933.6	1169.8	0.1352	2.0370	40.0		
50.0	28.97	0.017274	8.4967	3.7275	250.2	923.9	1174.1	0.2349	1.9967	50.0		
60.0	28.01	0.017383	7.1562	3.4744	262.2	915.4	1177.6	0.3349	1.9694	60.0		
70.0	26.83	0.017482	6.1875	3.2500	272.7	907.8	1180.6	0.4111	1.9516	70.0		
80.0	25.58	0.017573	5.4536	3.0512	282.1	900.9	1183.1	0.4534	1.9372	80.0		
90.0	24.28	0.017659	4.8779	2.8647	290.7	894.6	1185.3	0.4643	1.9258	90.0		
100.0	22.96	0.017740	4.4133	2.6955	298.5	888.6	1187.2	0.4743	1.9166	100.0		
110.0	21.64	0.01782	4.0306	2.5484	305.8	883.1	1188.9	0.4834	1.9092	110.0		
120.0	20.32	0.01789	3.7027	2.4204	312.6	877.8	1190.4	0.4919	1.9030	120.0		
130.0	19.00	0.01795	3.4275	2.3064	319.0	872.8	1191.7	0.4998	1.8978	130.0		
140.0	17.68	0.01800	3.2004	2.2044	325.0	868.0	1193.0	0.5071	1.8934	140.0		
150.0	16.36	0.01805	3.0190	2.1126	330.6	863.4	1194.1	0.5141	1.8896	150.0		
160.0	15.04	0.01810	2.8655	2.0300	335.9	859.0	1195.1	0.5206	1.8861	160.0		
170.0	13.72	0.01815	2.7356	1.9556	340.9	854.7	1196.0	0.5269	1.8836	170.0		
180.0	12.40	0.01820	2.6252	1.8884	345.7	850.6	1196.9	0.5328	1.8813	180.0		
190.0	11.08	0.01825	2.5312	1.8278	350.3	846.7	1197.6	0.5384	1.8791	190.0		
200.0	9.76	0.01833	2.3847	1.7724	350.9	842.8	1198.3	0.5438	1.8770	200.0		
210.0	8.44	0.01839	2.2689	1.7218	355.5	839.1	1199.0	0.5490	1.8751	210.0		
220.0	7.12	0.01844	2.1633	1.6749	359.9	835.4	1199.6	0.5534	1.8734	220.0		
230.0	5.80	0.01850	2.0679	1.6306	364.2	831.8	1200.1	0.5588	1.8718	230.0		
240.0	4.48	0.01855	1.9799	1.5886	368.3	828.4	1200.6	0.5634	1.8704	240.0		
250.0	3.16	0.01860	1.8990	1.5487	372.3	825.0	1201.1	0.5679	1.8691	250.0		
260.0	1.84	0.01865	1.8245	1.5106	376.1	821.6	1201.5	0.5722	1.8679	260.0		
270.0	0.52	0.01870	1.7548	1.4741	379.9	818.3	1201.9	0.5764	1.8668	270.0		
280.0	0.20	0.01875	1.6913	1.4387	383.6	815.1	1202.3	0.5805	1.8658	280.0		
290.0	0.08	0.01880	1.6319	1.4042	387.1	812.0	1202.6	0.5844	1.8649	290.0		
300.0	0.04	0.01885	1.5759	1.3706	390.6	809.0	1202.9	0.5882	1.8641	300.0		
350.0	431.73	0.01892	1.3294	1.2274	394.0	804.9	1203.9	0.6059	1.8630	350.0		
400.0	444.60	0.01934	1.1412	1.1605	424.2	780.4	1204.6	0.6217	1.8627	400.0		

ПОСОВИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

456.28	0.01954	1.01224	1.03179	437.3	767.5	1204.8	0.6360	0.8378	1.4738	458.0
467.01	0.01975	0.90787	0.92762	449.5	755.1	1204.7	0.6490	0.8148	1.4639	500.0
476.94	0.01994	0.82183	0.84177	460.9	743.3	1203.3	0.6611	0.7936	1.4547	550.0
486.20	0.02013	0.74962	0.76975	471.7	732.0	1202.7	0.6723	0.7738	1.4461	600.0
494.89	0.02032	0.68811	0.70843	481.9	720.9	1202.8	0.6828	0.7552	1.4381	650.0
503.08	0.02050	0.63505	0.65556	491.6	710.2	1201.8	0.6928	0.7377	1.4304	700.0
510.84	0.02069	0.58880	0.60949	500.9	699.8	1200.7	0.7022	0.7210	1.4232	750.0
518.21	0.02087	0.54809	0.56896	509.8	689.6	1199.4	0.7111	0.7051	1.4163	800.0
525.24	0.02105	0.51197	0.53302	518.4	679.5	1198.0	0.7197	0.6899	1.4096	850.0
531.95	0.02123	0.47968	0.50091	526.7	669.7	1196.4	0.7279	0.6753	1.4032	900.0
538.39	0.02141	0.45064	0.47205	534.7	660.0	1194.7	0.7358	0.6612	1.3970	950.0
544.58	0.02159	0.42436	0.44596	542.6	650.4	1192.9	0.7434	0.6476	1.3910	1000.0
550.53	0.02177	0.40047	0.42224	550.1	640.9	1191.0	0.7507	0.6344	1.3851	1050.0
556.28	0.02195	0.37863	0.40058	557.5	631.5	1189.1	0.7578	0.6216	1.3794	1100.0
561.82	0.02214	0.35859	0.38073	564.8	622.2	1187.0	0.7647	0.6091	1.3738	1150.0
567.19	0.02232	0.34013	0.36245	571.9	613.0	1184.8	0.7714	0.5969	1.3683	1200.0
572.38	0.02250	0.32306	0.34556	578.8	603.8	1182.6	0.7780	0.5850	1.3630	1250.0
577.49	0.02269	0.30722	0.32991	585.6	594.6	1180.2	0.7843	0.5733	1.3577	1300.0
582.27	0.02288	0.29250	0.31573	592.3	585.4	1177.8	0.7906	0.5620	1.3525	1350.0
587.10	0.02307	0.27871	0.30176	598.8	576.5	1175.3	0.7966	0.5507	1.3474	1400.0
591.70	0.02327	0.26594	0.28711	605.3	567.4	1172.8	0.8026	0.5397	1.3423	1450.0
596.09	0.02346	0.25372	0.27319	611.7	558.4	1170.1	0.8085	0.5288	1.3373	1500.0
600.59	0.02365	0.24205	0.26001	617.9	549.4	1167.4	0.8142	0.5182	1.3324	1550.0
604.97	0.02385	0.23085	0.24741	624.0	540.3	1164.5	0.8199	0.5076	1.3274	1600.0
609.05	0.02407	0.22019	0.23541	630.4	531.2	1161.5	0.8254	0.4971	1.3225	1650.0
613.13	0.02428	0.21178	0.23607	636.5	522.2	1158.6	0.8309	0.4867	1.3176	1700.0
617.12	0.02450	0.20263	0.22713	642.5	513.3	1155.6	0.8363	0.4765	1.3128	1750.0
621.02	0.02472	0.19390	0.21861	648.5	503.8	1152.3	0.8417	0.4662	1.3079	1800.0
624.83	0.02495	0.18558	0.21052	654.5	494.6	1149.0	0.8470	0.4561	1.3030	1850.0
628.56	0.02517	0.17761	0.20278	660.4	485.2	1145.5	0.8522	0.4459	1.2981	1900.0
632.22	0.02541	0.16999	0.19540	666.3	475.8	1142.0	0.8574	0.4358	1.2931	1950.0
635.80	0.02565	0.16266	0.18831	672.1	466.2	1138.3	0.8625	0.4256	1.2881	2000.0
642.76	0.02615	0.14885	0.17501	683.8	446.7	1130.5	0.8727	0.4053	1.2780	2100.0
649.45	0.02669	0.13603	0.16272	695.5	426.7	1122.2	0.8828	0.3848	1.2676	2200.0
655.89	0.02727	0.12406	0.15133	707.2	406.0	1113.2	0.8929	0.3640	1.2569	2300.0
662.11	0.02790	0.11287	0.14076	719.0	384.8	1103.7	0.9031	0.3430	1.2460	2400.0
668.11	0.02859	0.10209	0.13068	731.7	361.6	1093.3	0.9139	0.3206	1.2345	2500.0
673.91	0.02938	0.09179	0.12110	744.7	337.5	1082.0	0.9247	0.2977	1.2225	2600.0
679.53	0.03029	0.08165	0.11194	757.3	312.5	1069.9	0.9356	0.2741	1.2097	2700.0
684.96	0.03134	0.07171	0.10306	770.7	282.1	1056.6	0.9468	0.2491	1.1958	2800.0
690.22	0.03262	0.06158	0.09420	785.1	254.1	1039.8	0.9586	0.2215	1.1810	2900.0
695.33	0.03428	0.05073	0.08500	801.8	218.4	1020.9	0.9714	0.1891	1.1653	3000.0
700.28	0.03581	0.03771	0.07452	820.8	168.3	993.6	0.9844	0.1460	1.1487	3100.0
705.08	0.04472	0.01191	0.05663	872.5	56.1	931.6	1.0351	0.0914	1.0832	3200.0
705.47	0.05078	0.00000	0.05078	906.0	0.0	906.0	1.0612	0.0000	1.0612	3200.2*

ТАБЛИЦА 46.2 Насыщенный пар: Таблица значений давления (0,08865 до 3208,2 фунт на кв. дюйм)

Температура, (град. по Фаренгейту)	Абсолютное давление, (фунт на кв. дюйм)			Удельный объем			Энтальпия			Энтропия			Температура, (град. по Фаренгейту)
	Р	на кв. дюйм											
t	Р	на кв. дюйм	t										
0,08865	32,018	0,016022	3302,4	0,0003	1075,5	1075,5	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
0,25	59,323	0,016032	1235,5	27,382	1061,5	1061,5	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
0,50	79,586	0,016071	641,5	47,623	1046,6	1046,6	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
1,0	101,74	0,016136	333,59	83,359	1031,6	1031,6	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
5,0	162,24	0,016407	73,515	130,20	1009,9	1009,9	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
10,0	193,21	0,016592	38,404	161,26	987,1	987,1	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
14,696	212,00	0,016719	26,782	180,17	970,3	970,3	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
15,0	213,03	0,016726	26,274	181,21	969,7	969,7	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
20,0	227,96	0,016834	20,070	196,27	960,1	960,1	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
30,0	250,34	0,017009	13,7766	218,9	945,2	945,2	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
40,0	267,25	0,017151	10,4794	236,1	932,9	932,9	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
50,0	281,92	0,017274	8,4967	250,2	923,9	923,9	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
60,0	302,03	0,017383	7,1562	262,2	915,4	915,4	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
70,0	322,08	0,017482	6,1875	272,7	907,8	907,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
80,0	342,08	0,017573	5,4936	282,1	900,9	900,9	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
90,0	362,78	0,017659	4,8953	290,7	894,6	894,6	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
100,0	382,82	0,017740	4,4133	298,5	888,6	888,6	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
110,0	402,79	0,01782	4,0006	305,8	883,1	883,1	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
120,0	422,33	0,01789	3,6627	312,6	877,8	877,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
130,0	441,33	0,01795	3,3944	319,0	872,8	872,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
140,0	459,84	0,01800	3,2014	325,0	868,0	868,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
150,0	477,93	0,01805	3,0796	330,6	863,4	863,4	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
160,0	495,65	0,01811	2,9958	335,9	859,0	859,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
170,0	513,04	0,01817	2,9355	341,2	854,8	854,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
180,0	530,18	0,01823	2,8878	346,5	850,8	850,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
190,0	547,08	0,01829	2,8512	350,9	847,0	847,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
200,0	563,77	0,01833	2,8247	355,0	843,4	843,4	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
210,0	580,28	0,01839	2,8089	358,5	840,0	840,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
220,0	596,65	0,01844	2,7937	362,2	836,8	836,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
230,0	612,91	0,01850	2,7790	365,2	833,8	833,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
240,0	629,00	0,01855	2,7648	368,3	831,0	831,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
250,0	644,97	0,01860	2,7511	371,3	828,4	828,4	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
260,0	660,84	0,01865	2,7378	374,3	826,0	826,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
270,0	676,64	0,01870	2,7250	377,1	823,8	823,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
280,0	692,39	0,01875	2,7126	380,0	821,8	821,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
290,0	708,09	0,01880	2,7006	382,6	819,9	819,9	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
300,0	723,76	0,01885	2,6890	385,6	818,2	818,2	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
310,0	739,40	0,01892	2,6778	388,3	816,7	816,7	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
320,0	755,02	0,01899	2,6670	390,6	815,3	815,3	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
330,0	770,63	0,01907	2,6566	392,6	814,0	814,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
340,0	786,24	0,01915	2,6465	394,4	812,8	812,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
350,0	801,86	0,01923	2,6367	396,0	811,7	811,7	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
360,0	817,49	0,01931	2,6272	397,4	810,7	810,7	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
370,0	833,14	0,01939	2,6180	398,6	810,0	810,0	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
380,0	848,81	0,01947	2,6091	399,6	809,3	809,3	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
390,0	864,50	0,01955	2,6005	400,4	808,8	808,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
400,0	880,21	0,01963	2,5922	401,0	808,4	808,4	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
410,0	895,94	0,01971	2,5842	401,5	808,1	808,1	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
420,0	911,69	0,01979	2,5764	401,9	807,9	807,9	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
430,0	927,46	0,01987	2,5689	402,2	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
440,0	943,25	0,01995	2,5617	402,4	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
450,0	959,06	0,01999	2,5548	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
460,0	974,89	0,02003	2,5482	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
470,0	990,74	0,02007	2,5419	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
480,0	1006,61	0,02011	2,5359	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
490,0	1022,50	0,02015	2,5302	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
500,0	1038,41	0,02019	2,5248	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
510,0	1054,34	0,02023	2,5196	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
520,0	1070,29	0,02027	2,5146	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
530,0	1086,26	0,02031	2,5098	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
540,0	1102,25	0,02035	2,5052	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
550,0	1118,26	0,02039	2,5008	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
560,0	1134,29	0,02043	2,4966	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
570,0	1150,34	0,02047	2,4926	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
580,0	1166,41	0,02051	2,4888	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
590,0	1182,50	0,02055	2,4852	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
600,0	1198,61	0,02059	2,4818	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
610,0	1214,74	0,02063	2,4786	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
620,0	1230,89	0,02067	2,4756	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
630,0	1247,06	0,02071	2,4728	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
640,0	1263,25	0,02075	2,4702	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
650,0	1279,46	0,02079	2,4678	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
660,0	1295,69	0,02083	2,4656	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
670,0	1311,94	0,02087	2,4636	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
680,0	1328,21	0,02091	2,4618	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
690,0	1344,50	0,02095	2,4602	402,5	807,8	807,8	0,0000	2,1872	2,1872	0,08865			
700,0	1360,81	0,02099	2,4588	402,5	807,8	807,8	0,00						

ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

450.0	0.01954	1.03179	433.3	767.5	1204.8	0.6360	0.88378	1.4738	450.0
500.0	0.01963	1.03187	440.3	755.1	1204.7	0.6490	0.8148	1.4639	500.0
550.0	0.01973	1.03195	449.5	743.3	1204.5	0.6611	0.7936	1.4547	550.0
600.0	0.01983	1.03203	461.7	720.8	1204.3	0.6723	0.7738	1.4461	600.0
650.0	0.01993	1.03211	481.6	710.2	1204.2	0.6828	0.7552	1.4381	650.0
700.0	0.02005	1.03219	491.6	710.2	1204.1	0.6928	0.7377	1.4304	700.0
750.0	0.02019	1.03227	509.9	699.8	1200.7	0.7022	0.7210	1.4232	750.0
800.0	0.02033	1.03235	508.8	689.2	1199.4	0.7111	0.7051	1.4163	800.0
850.0	0.02047	1.03243	518.4	679.5	1198.0	0.7197	0.6903	1.4095	850.0
900.0	0.02061	1.03251	528.7	669.7	1196.4	0.7279	0.6759	1.4032	900.0
950.0	0.02075	1.03259	537.7	660.3	1194.7	0.7358	0.6623	1.3970	950.0
1000.0	0.02089	1.03267	547.6	650.4	1192.9	0.7434	0.6496	1.3910	1000.0
1050.0	0.02103	1.03275	550.1	640.9	1191.0	0.7507	0.6376	1.3851	1050.0
1100.0	0.02117	1.03282	554.8	631.5	1189.1	0.7578	0.6264	1.3794	1100.0
1150.0	0.02131	1.03289	557.8	622.2	1187.0	0.7647	0.6160	1.3739	1150.0
1200.0	0.02145	1.03296	561.9	613.0	1184.8	0.7714	0.6063	1.3685	1200.0
1250.0	0.02159	1.03303	578.8	603.8	1182.6	0.7780	0.5973	1.3630	1250.0
1300.0	0.02172	1.03310	585.6	594.6	1180.2	0.7843	0.5733	1.3577	1300.0
1350.0	0.02186	1.03317	593.3	585.4	1177.8	0.7906	0.5520	1.3525	1350.0
1400.0	0.02199	1.03324	598.8	576.5	1175.3	0.7966	0.5307	1.3474	1400.0
1450.0	0.02212	1.03331	605.3	567.4	1172.8	0.8025	0.5097	1.3423	1450.0
1500.0	0.02225	1.03338	611.7	558.4	1170.1	0.8085	0.4888	1.3373	1500.0
1550.0	0.02238	1.03345	618.0	549.4	1167.4	0.8142	0.4682	1.3324	1550.0
1600.0	0.02251	1.03352	624.2	540.3	1164.5	0.8199	0.4479	1.3274	1600.0
1650.0	0.02264	1.03359	630.4	531.3	1161.6	0.8254	0.4278	1.3225	1650.0
1700.0	0.02277	1.03366	636.5	522.2	1158.6	0.8309	0.4077	1.3176	1700.0
1750.0	0.02290	1.03373	642.5	513.1	1155.6	0.8363	0.3876	1.3128	1750.0
1800.0	0.02303	1.03380	648.5	503.8	1152.3	0.8417	0.3675	1.3079	1800.0
1850.0	0.02316	1.03387	654.5	494.6	1149.0	0.8470	0.3474	1.3030	1850.0
1900.0	0.02329	1.03394	660.3	485.4	1145.6	0.8522	0.3273	1.2981	1900.0
1950.0	0.02342	1.03401	666.3	476.2	1142.2	0.8574	0.3072	1.2932	1950.0
2000.0	0.02355	1.03408	672.1	467.0	1138.8	0.8625	0.2871	1.2883	2000.0
2100.0	0.02368	1.03415	685.8	446.5	1135.0	0.8676	0.2670	1.2834	2100.0
2200.0	0.02381	1.03422	695.5	426.0	1131.2	0.8727	0.2469	1.2785	2200.0
2300.0	0.02394	1.03429	707.2	406.0	1127.2	0.8778	0.2268	1.2736	2300.0
2400.0	0.02407	1.03436	719.0	384.8	1123.7	0.8829	0.2067	1.2687	2400.0
2500.0	0.02420	1.03443	731.7	361.6	1120.3	0.9139	0.3206	1.2638	2500.0
2600.0	0.02433	1.03450	744.5	337.6	1116.8	0.9247	0.2977	1.2225	2600.0
2700.0	0.02446	1.03457	757.3	312.3	1113.2	0.9356	0.2741	1.2097	2700.0
2800.0	0.02459	1.03464	770.7	285.1	1109.5	0.9468	0.2491	1.1958	2800.0
2900.0	0.02472	1.03471	785.1	254.7	1105.8	0.9588	0.2215	1.1803	2900.0
3000.0	0.02485	1.03478	801.8	218.4	1102.0	0.9728	0.1891	1.1619	3000.0
3100.0	0.02498	1.03485	824.0	169.3	993.3	0.9914	0.1460	1.1373	3100.0
3200.0	0.02511	1.03492	875.1	56.1	931.6	1.0351	0.0482	1.0612	3200.0*
3200.2*	0.02514	1.03495	906.0	0.0	906.0	1.0612	0.0000	1.0612	3200.2*

ТАБЛИЦА 46.3 Перетретый пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм)

Абсолютное давление фунтов на кв. дюйм (при температуре насыщения)		Температура в град. по Фаренгейту													
		200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	1000	1100	1200	
1 (101.74)	Sh	98.26	148.26	198.26	248.26	298.26	348.26	398.26	448.26	598.26	698.26	798.26	898.26	998.26	1098.26
	v	362.5	427.4	482.3	537.2	592.1	647.0	701.9	756.8	861.7	966.6	1071.5	1176.4	1281.3	1386.2
	s	0.1326	1.9781	2.0509	2.0681	2.1132	2.1445	2.1722	2.1985	2.2237	2.2708	2.3144	2.3551	2.4296	2.4680
5 (162.24)	Sh	37.26	67.26	97.26	127.26	157.26	187.26	217.26	247.26	337.26	437.26	537.26	637.26	737.26	837.26
	v	0.01641	73.53	78.14	84.21	90.24	96.25	102.24	108.23	114.21	120.15	126.15	132.08	138.08	144.15
	s	0.2349	1.8443	1.8716	1.9054	1.9469	1.9864	1.9943	1.9943	1.9943	1.9943	1.9943	1.9943	1.9943	1.9943
10 (193.21)	Sh	0.01659	38.42	41.93	44.98	48.02	51.03	54.04	57.04	63.03	69.00	74.98	80.94	86.91	92.87
	v	161.26	1143.3	1146.6	1170.2	1193.7	1217.1	1240.6	1264.1	1287.8	1335.5	1384.0	1433.2	1483.5	1534.6
	s	0.28336	1.7879	1.7928	1.8273	1.8593	1.8892	1.9173	1.9439	1.9692	2.0166	2.0603	2.1011	2.1394	2.1757
15 (213.03)	Sh	0.01673	26.799	28.42	30.52	32.60	34.67	36.72	38.77	42.86	46.83	51.00	55.06	59.13	63.19
	v	181.21	1150.9	1168.7	1192.5	1216.2	1239.9	1263.6	1287.3	1335.2	1383.8	1433.2	1483.4	1534.5	1586.5
	s	0.3137	1.7552	1.7809	1.8134	1.8437	1.8720	1.8988	1.9242	1.9719	2.0177	2.0585	2.0969	2.1332	2.1676
20 (227.96)	Sh	0.01673	26.290	27.837	29.899	31.939	33.963	35.977	37.985	41.986	45.978	49.964	53.946	57.926	61.905
	v	196.27	1156.3	1167.1	1191.4	1215.4	1239.2	1263.0	1286.9	1335.2	1383.8	1433.2	1483.4	1534.5	1586.5
	s	0.3358	1.7320	1.7475	1.7805	1.8111	1.8397	1.8666	1.8921	1.9711	2.0155	2.0563	2.0946	2.1309	2.1653
25 (240.07)	Sh	0.01693	16.301	17.829	19.076	20.307	21.527	22.740	23.945	25.153	27.557	29.954	32.348	34.740	37.130
	v	208.32	1160.6	1165.6	1190.2	1214.5	1238.5	1262.4	1286.4	1334.6	1383.3	1432.7	1482.0	1531.2	1580.2
	s	0.3355	1.7141	1.7212	1.7547	1.7856	1.8145	1.8415	1.8672	1.9149	1.9588	1.9997	2.0381	2.0744	2.1089
30 (250.34)	Sh	0.01701	13.744	14.816	15.859	16.892	17.914	18.926	19.945	20.945	22.965	24.985	26.995	28.943	30.936
	v	218.93	1164.1	1189.0	1213.6	1237.8	1261.9	1286.0	1310.1	1334.2	1383.0	1432.2	1481.2	1530.4	1580.0
	s	0.3682	1.6995	1.7334	1.7647	1.7937	1.8210	1.8467	1.8746	1.9386	1.9795	2.0179	2.0543	2.0888	2.1217

35 (259,29)	Sh	0,01708	11,896	40,71	90,71	140,71	190,71	240,71	340,71	440,71	540,71	640,71	740,71	840,71	940,71
	v	228,03	1167,1	1878	2127	2737	3263	3855	4327	4827	5339	5827	6309	6789	7270
	h	0,3809	1,6872	1,7152	1,7468	1,7761	1,8035	1,8294	1,8774	1,9214	1,9624	2,0009	2,0372	2,0717	2,1046
40 (267,25)	Sh	0,01715	10,497	32,75	82,75	132,75	182,75	232,75	332,75	432,75	532,75	632,75	732,75	832,75	932,75
	v	236,14	1169,8	1186,6	1211,7	1236,4	1260,8	1285,0	1333,6	1382,5	1432,1	1482,5	1533,7	1585,8	1638,8
	s	0,3921	1,6765	1,6992	1,7312	1,7608	1,7883	1,8143	1,8624	1,9065	1,9476	1,9860	2,0224	2,0569	2,0899
45 (274,44)	Sh	0,01721	9,399	25,56	75,56	125,56	175,56	225,56	325,56	425,56	525,56	625,56	725,56	825,56	925,56
	v	243,49	1172,1	9,777	10,497	11,201	11,892	12,577	13,392	14,165	14,947	15,769	16,614	17,500	18,423
	s	0,4021	1,6671	1,8549	1,9173	1,9471	1,9748	1,8010	1,8492	1,8934	1,9345	1,9730	2,0093	2,0439	2,0768
50 (281,02)	Sh	0,01727	8,514	18,98	68,98	118,98	168,98	218,98	318,98	418,98	518,98	618,98	718,98	818,98	918,98
	v	250,21	1177,6	8,769	9,424	10,062	10,688	11,306	12,529	13,741	14,947	16,150	17,350	18,549	19,746
	s	0,4112	1,6586	1,6720	1,7048	1,7349	1,7628	1,7890	1,8374	1,8816	1,9227	1,9613	1,9977	2,0322	2,0652
55 (287,07)	Sh	0,01733	7,945	12,93	62,93	112,93	162,93	212,93	312,93	412,93	512,93	612,93	712,93	812,93	912,93
	v	256,43	1179,1	1182,9	1208,9	1234,2	1259,1	1283,6	1332,6	1381,8	1431,5	1482,0	1533,3	1585,5	1638,5
	s	0,4196	1,6590	1,6601	1,6933	1,7237	1,7518	1,7781	1,8266	1,8710	1,9121	1,9507	1,987	2,022	2,055
60 (292,71)	Sh	0,01738	7,174	7,29	57,29	107,29	157,29	207,29	307,29	407,29	507,29	607,29	707,29	807,29	907,29
	v	262,21	1177,6	7,257	7,815	8,354	8,881	9,400	10,475	11,438	12,446	13,450	14,452	15,452	16,450
	s	0,4273	1,6440	1,6492	1,6934	1,7134	1,7417	1,7681	1,8168	1,8612	1,9024	1,9410	1,9774	2,0120	2,0450
65 (297,98)	Sh	0,01743	6,653	2,02	52,02	102,02	152,02	202,02	302,02	402,02	502,02	602,02	702,02	802,02	902,02
	v	267,63	1179,1	6,675	7,195	7,697	8,186	8,667	9,615	10,552	11,484	12,412	13,337	14,261	15,183
	s	0,4344	1,6375	1,8030	1,8070	1,8390	1,8722	1,9077	1,9319	1,9531	1,9716	1,9881	2,0028	2,0160	2,0279
70 (302,93)	Sh	0,01748	6,205	47,07	97,07	147,07	197,07	297,07	397,07	497,07	597,07	697,07	797,07	897,07	997,07
	v	272,74	1180,6	6,664	7,133	7,590	8,039	9,372	9,793	10,659	11,522	12,382	13,240	14,097	14,952
	s	0,4411	1,6316	1,6640	1,6951	1,7237	1,7504	1,7993	1,8439	1,8852	1,9238	1,9603	1,9949	2,0279	2,0592
75 (307,61)	Sh	0,01753	5,814	42,39	92,39	142,39	192,39	292,39	392,39	492,39	592,39	692,39	792,39	892,39	992,39
	v	277,66	1181,9	6,206	6,645	7,074	7,494	8,370	9,135	9,945	10,750	11,553	12,355	13,155	13,955
	s	0,4474	1,6260	1,6554	1,6868	1,7156	1,7424	1,7915	1,8361	1,8774	1,9161	1,9526	1,9872	2,0202	2,0512

Sh = переверз, град. по Фаренгейту  
 v = удельный объем, кубич. футов на фунт  
 h = Энтальпия, Вт/фунт  
 s = Энтропия, Вт/град. по Фаренгейту/фунт

ТАБЛИЦА 46.3 Перегретый пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм)

Абсолютное давление фунтов на кв. дюйм (при температуре насыщения)	Температура в град. по Фаренгейту														
	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	
1 (101.74)	Sh	98.26	148.26	198.26	248.26	298.26	348.26	398.26	498.26	598.26	698.26	798.26	898.26	998.26	1098.26
	v	0.01614	333.6	422.4	482.1	511.9	571.5	631.1	690.7	750.3	809.8	869.4	929.0	988.6	1048.2
	h	69.73	1108.8	1150.2	1172.9	1218.7	1241.8	1265.1	1288.6	1336.1	1384.5	1433.7	1483.8	1534.9	1586.8
5 (162.24)	Sh	37.76	87.76	137.76	187.76	237.76	287.76	337.76	437.76	537.76	637.76	737.76	837.76	937.76	1037.76
	v	0.01641	73.53	78.14	84.21	90.24	96.25	102.24	108.23	114.21	120.18	126.14	132.08	138.01	143.94
	h	130.20	1131.1	1148.6	1171.7	1194.8	1218.0	1241.3	1264.7	1288.2	1335.9	1384.3	1433.6	1483.7	1534.7
10 (193.21)	Sh	6.79	56.79	106.79	156.79	206.79	256.79	306.79	406.79	506.79	606.79	706.79	806.79	906.79	1006.79
	v	0.01659	38.42	41.93	44.98	48.02	51.03	54.04	57.04	63.03	69.00	74.98	80.94	86.91	92.87
	h	161.26	1143.3	1170.2	1193.7	1217.1	1240.6	1264.1	1287.8	1335.5	1384.0	1433.4	1483.5	1534.6	1586.6
15 (213.03)	Sh	38.00	88.00	138.00	188.00	238.00	288.00	338.00	438.00	538.00	638.00	738.00	838.00	938.00	1038.00
	v	0.01673	26.990	28.42	30.52	32.60	34.67	36.72	38.77	42.86	46.93	51.00	55.06	59.13	63.19
	h	180.17	1150.9	1168.8	1197.6	1216.3	1239.9	1263.6	1287.4	1335.2	1383.8	1433.2	1483.4	1534.5	1586.5
20 (227.96)	Sh	36.97	86.97	136.97	186.97	236.97	286.97	336.97	436.97	536.97	636.97	736.97	836.97	936.97	1036.97
	v	0.01673	26.290	27.837	29.899	31.939	33.963	35.977	37.985	41.986	45.978	49.964	53.946	57.926	61.905
	h	196.27	1156.3	1174.5	1192.5	1216.2	1239.9	1263.6	1287.3	1335.2	1383.8	1433.2	1483.4	1534.5	1586.5
25 (240.07)	Sh	1.7809	1.8134	1.8437	1.8720	1.8988	1.9242	1.9471	2.0155	2.0563	2.0946	2.1309	2.1653	2.1982	2.2300
	v	0.01683	20.087	22.088	24.346	27.004	29.932	33.090	36.428	40.000	43.846	47.904	52.124	56.544	61.104
	h	196.27	1156.3	1174.5	1192.5	1216.2	1239.9	1263.6	1287.3	1335.2	1383.8	1433.2	1483.4	1534.5	1586.5
30 (250.34)	Sh	0.93	59.93	109.93	159.93	209.93	259.93	309.93	409.93	509.93	609.93	709.93	809.93	909.93	1009.93
	v	0.01693	16.301	16.538	17.007	17.415	17.765	18.058	18.293	18.570	18.888	19.244	19.634	20.054	20.504
	h	208.52	1160.6	1165.9	1170.9	1175.5	1179.8	1183.7	1187.2	1191.4	1195.3	1199.0	1202.5	1205.8	1208.9
35 (259.34)	Sh	49.66	99.66	149.66	199.66	249.66	299.66	349.66	449.66	549.66	649.66	749.66	849.66	949.66	1049.66
	v	0.01701	13.744	14.810	15.859	16.892	17.914	18.929	20.945	22.951	24.954	26.949	28.943	30.936	32.927
	h	218.93	1164.1	1180.0	1213.6	1261.9	1286.0	1334.2	1383.0	1432.5	1482.8	1534.0	1586.1	1639.3	1693.0
40 (268.34)	Sh	1.7334	1.7647	1.7937	1.8210	1.8467	1.8672	1.9149	1.9588	1.9957	2.0381	2.0744	2.1089	2.1418	2.1721
	v	0.01701	13.744	14.810	15.859	16.892	17.914	18.929	20.945	22.951	24.954	26.949	28.943	30.936	32.927
	h	218.93	1164.1	1180.0	1213.6	1261.9	1286.0	1334.2	1383.0	1432.5	1482.8	1534.0	1586.1	1639.3	1693.0

35 (259.29)	Sh	0,01708	11,886	40,71	90,71	140,71	190,71	240,71	340,71	440,71	540,71	640,71	740,71	840,71	940,71
	v	228,03	1167,1	1878,8	2127,2	2357,1	2613,3	2885,5	3339,9	3827,8	4327,3	4827,2	5327,1	5827,0	6326,9
	h	0,3809	1,6872	1,7152	1,7468	1,7761	1,8035	1,8294	1,8524	1,8734	1,8924	1,9094	1,9244	1,9374	1,9496
40 (267,25)	Sh	0,01715	10,497	32,75	82,75	132,75	182,75	232,75	332,75	432,75	532,75	632,75	732,75	832,75	932,75
	v	236,14	1169,8	1103,6	1183,8	1264,3	1346,8	1430,8	1515,5	1600,8	1687,5	1774,8	1862,8	1951,5	2040,8
	h	0,3921	1,6765	1,6992	1,7312	1,7608	1,7883	1,8143	1,8384	1,8604	1,8804	1,8984	1,9154	1,9314	1,9464
45 (274,44)	Sh	0,01721	9,389	25,56	75,56	125,56	175,56	225,56	325,56	425,56	525,56	625,56	725,56	825,56	925,56
	v	243,40	1172,1	6,777	10,407	11,201	11,992	12,777	13,562	14,347	15,132	15,917	16,702	17,487	18,272
	h	0,4021	1,6671	1,6849	1,7104	1,7357	1,7602	1,7846	1,8083	1,8313	1,8533	1,8753	1,8973	1,9193	1,9413
50 (281,02)	Sh	0,01727	8,514	18,98	68,98	118,98	168,98	218,98	318,98	418,98	518,98	618,98	718,98	818,98	918,98
	v	250,21	1174,1	8,769	9,424	10,062	10,688	11,306	11,919	12,529	13,141	13,741	14,341	14,941	15,541
	h	0,4112	1,6586	1,6841	1,7099	1,7349	1,7596	1,7841	1,8082	1,8329	1,8572	1,8811	1,9047	1,9281	1,9511
55 (287,07)	Sh	0,01733	7,945	12,93	62,93	112,93	162,93	212,93	312,93	412,93	512,93	612,93	712,93	812,93	912,93
	v	256,43	1179,1	7,945	8,546	9,130	9,702	10,267	10,831	11,381	11,931	12,485	13,038	13,588	14,141
	h	0,4196	1,6501	1,6601	1,6933	1,7237	1,7518	1,7781	1,8026	1,8266	1,8501	1,8731	1,8956	1,9176	1,9391
60 (292,71)	Sh	0,01738	7,174	7,29	57,29	107,29	157,29	207,29	307,29	407,29	507,29	607,29	707,29	807,29	907,29
	v	262,21	1177,6	7,257	7,815	8,354	8,881	9,400	10,025	10,645	11,266	11,886	12,506	13,126	13,746
	h	0,4273	1,6440	1,6492	1,6934	1,7134	1,7417	1,7681	1,7926	1,8166	1,8401	1,8631	1,8856	1,9081	1,9301
65 (297,98)	Sh	0,01743	6,653	2,02	52,02	102,02	152,02	202,02	302,02	402,02	502,02	602,02	702,02	802,02	902,02
	v	267,63	1179,1	6,675	7,195	7,697	8,186	8,667	9,145	9,615	10,082	10,548	11,015	11,482	11,949
	h	0,4344	1,6375	1,180,3	1,207,0	1,234,0	1,261,0	1,288,0	1,315,0	1,342,0	1,369,0	1,396,0	1,423,0	1,450,0	1,477,0
70 (302,93)	Sh	0,01748	6,205	4,79	47,07	97,07	147,07	197,07	297,07	397,07	497,07	597,07	697,07	797,07	897,07
	v	272,74	1180,6	6,664	7,133	7,590	8,039	8,492	8,950	9,413	9,881	10,354	10,831	11,313	11,795
	h	0,4411	1,6316	1,206,0	1,232,0	1,257,0	1,282,0	1,307,0	1,331,0	1,356,0	1,380,0	1,404,0	1,428,0	1,452,0	1,476,0
75 (307,61)	Sh	0,01753	5,814	4,29	42,39	92,39	142,39	192,39	292,39	392,39	492,39	592,39	692,39	792,39	892,39
	v	277,96	1181,9	6,204	6,645	7,074	7,494	7,920	8,350	8,785	9,225	9,665	10,105	10,545	10,985
	h	0,4474	1,6260	1,205,0	1,231,0	1,256,0	1,281,0	1,306,0	1,331,0	1,356,0	1,381,0	1,406,0	1,431,0	1,456,0	1,481,0

Sh = перегрев, град. по Фаренгейту  
v = удельный объем, куб. футов на фунт

h = Энтальпия, Вт/фунт  
s = Энтропия, Вт/град. по Фаренгейту/фунт

ТАБЛИЦА 46.3 Преретный пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм) (Продолжение)

Абсолютное давление на кв. дюйм (при температуре насыщения)		Температура в град. по Фаренгейту															
		350	400	450	500	550	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1480	
80 (312.04)	Sh	37.96	87.96	137.96	187.96	237.96	287.96	387.96	487.96	587.96	687.96	787.96	887.96	987.96	1087.96	1187.96	
	v	0.01757	5.471	5.901	6.238	6.522	6.768	7.008	7.240	7.464	7.680	7.888	8.088	8.280	8.464	8.632	
	h	282.15	1183.1	1204.0	1230.5	1256.2	1281.3	1306.2	1330.9	1355.3	1379.5	1403.5	1427.2	1450.6	1473.6	1496.2	1518.4
85 (316.26)	Sh	33.74	83.74	133.74	183.74	233.74	283.74	383.74	483.74	583.74	683.74	783.74	883.74	983.74	1083.74	1183.74	
	v	0.01762	5.167	5.445	5.840	6.273	6.597	6.965	7.330	7.692	8.052	8.410	8.766	9.120	9.472	9.822	
	h	286.52	1184.2	1203.0	1229.7	1255.5	1280.8	1305.8	1330.2	1354.0	1377.2	1400.0	1422.4	1444.4	1466.0	1487.2	1508.0
90 (320.28)	Sh	29.72	79.72	129.72	179.72	229.72	279.72	379.72	479.72	579.72	679.72	779.72	879.72	979.72	1079.72	1179.72	
	v	0.01766	4.895	5.128	5.505	5.869	6.223	6.572	6.917	7.260	7.600	7.936	8.270	8.600	8.928	9.252	
	h	290.69	1185.3	1202.0	1228.9	1254.9	1280.3	1305.4	1330.2	1354.8	1379.0	1402.8	1426.2	1449.2	1471.8	1494.0	1515.8
95 (324.13)	Sh	25.87	75.87	125.87	175.87	225.87	275.87	375.87	475.87	575.87	675.87	775.87	875.87	975.87	1075.87	1175.87	
	v	0.01770	4.651	4.845	5.205	5.551	5.889	6.221	6.548	6.871	7.190	7.506	7.818	8.126	8.430	8.730	
	h	294.70	1186.2	1200.9	1228.1	1254.3	1279.8	1305.0	1329.9	1354.5	1378.7	1402.5	1425.8	1448.6	1471.0	1492.8	1514.2
100 (327.82)	Sh	22.18	72.18	122.18	172.18	222.18	272.18	372.18	472.18	572.18	672.18	772.18	872.18	972.18	1072.18	1172.18	
	v	0.01774	4.431	4.590	4.935	5.266	5.588	5.904	6.216	6.523	6.826	7.124	7.418	7.708	7.994	8.276	
	h	298.54	1187.2	1199.9	1227.4	1253.7	1279.3	1304.6	1329.5	1353.9	1377.8	1401.2	1424.1	1446.5	1468.4	1489.8	1510.6
105 (331.37)	Sh	0.4743	1.6027	-1.6187	1.6516	1.6814	1.7088	1.7344	1.7586	1.8036	1.8451	1.8839	1.9205	1.9552	1.9883	2.0199	2.0502
	v	0.01778	4.231	4.359	4.690	5.007	5.315	5.617	5.915	6.209	6.500	6.788	7.072	7.352	7.628	7.900	8.168
	h	302.24	1188.0	1198.8	1226.6	1253.1	1278.8	1304.2	1329.2	1353.7	1377.6	1401.0	1423.8	1446.0	1467.6	1488.6	1509.0
110 (334.79)	Sh	15.21	65.21	115.21	165.21	215.21	265.21	365.21	465.21	565.21	665.21	765.21	865.21	965.21	1065.21	1165.21	
	v	0.01782	4.048	4.179	4.568	4.942	5.308	5.647	5.972	6.292	6.608	6.920	7.228	7.532	7.832	8.128	
	h	305.80	1188.9	1197.7	1225.8	1251.6	1276.8	1301.6	1326.0	1350.0	1373.6	1396.8	1419.6	1442.0	1463.8	1485.0	1505.6
115 (338.08)	Sh	11.82	61.82	111.82	161.82	211.82	261.82	361.82	461.82	561.82	661.82	761.82	861.82	961.82	1061.82	1161.82	
	v	0.01785	3.881	3.967	4.265	4.558	4.841	5.113	5.382	5.648	5.910	6.168	6.422	6.672	6.918	7.160	
	h	309.25	1189.7	1197.5	1225.9	1251.8	1277.0	1301.8	1326.2	1350.2	1373.8	1397.0	1419.8	1442.2	1464.0	1485.2	1505.8
120 (341.32)	Sh	8.46	58.46	108.46	158.46	208.46	258.46	358.46	458.46	558.46	658.46	758.46	858.46	958.46	1058.46	1158.46	
	v	0.01788	3.744	3.808	4.068	4.318	4.558	4.788	5.008	5.218	5.418	5.608	5.788	5.958	6.128	6.288	
	h	312.70	1190.5	1197.3	1226.0	1252.0	1277.2	1302.0	1326.4	1350.4	1374.0	1397.2	1420.0	1442.4	1464.2	1485.4	1506.0

ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

Sh	0,01789	3,7275	8,73	198,73	158,73	208,73	258,73	358,73	458,73	558,73	658,73	758,73	858,73	958,73	1058,73
h	31,558	1190,4	1,9516	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,4919	1,5879	1,5943	1,6286	1,6592	1,7132	1,7376	1,7829	1,8246	1,8635	1,9001	1,9349	1,9680	1,9996	2,0300
Sh	2,67	3,4574	5,833	10,618	16,493	20,67	25,267	35,67	45,67	55,67	65,67	75,67	85,67	95,67	105,67
h	0,1796	3,4690	1,934	3,7480	12,754	4,0120	4,357	4,7580	5,178	5,6184	6,0486	6,460	6,8639	7,2611	7,6533
s	0,4998	1,5813	1,5833	1,6182	1,6493	1,6775	1,7037	1,7283	1,7519	1,7754	1,7981	1,8206	1,843	1,8651	1,8871
Sh	0,01803	3,2190	5,833	10,618	16,493	20,67	25,267	35,67	45,67	55,67	65,67	75,67	85,67	95,67	105,67
h	3,2496	1193,0	1,934	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,5071	1,5752	1,5833	1,6085	1,6286	1,6522	1,6796	1,7052	1,7298	1,7534	1,7761	1,7981	1,8196	1,8406	1,8611
Sh	0,01809	3,0139	5,695	10,480	16,355	20,540	25,130	35,540	45,540	55,540	65,540	75,540	85,540	95,540	105,540
h	3,0465	1194,1	1,934	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,5141	1,5695	1,5752	1,6005	1,6206	1,6442	1,6716	1,6980	1,7236	1,7482	1,7719	1,7950	1,8176	1,8397	1,8613
Sh	0,01815	2,8336	5,515	10,300	16,175	20,360	24,950	35,360	45,360	55,360	65,360	75,360	85,360	95,360	105,360
h	3,0607	1195,1	1,934	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,5206	1,5641	1,5700	1,5953	1,6154	1,6390	1,6664	1,6928	1,7184	1,7431	1,7671	1,7906	1,8137	1,8364	1,8587
Sh	0,01821	2,6738	5,353	10,138	16,013	20,200	24,790	35,200	45,200	55,200	65,200	75,200	85,200	95,200	105,200
h	3,1174	1196,0	1,934	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,5269	1,5591	1,5650	1,5903	1,6104	1,6340	1,6614	1,6878	1,7134	1,7381	1,7621	1,7856	1,8087	1,8314	1,8537
Sh	0,01827	2,5312	5,211	9,996	15,871	19,960	24,550	34,960	44,960	54,960	64,960	74,960	84,960	94,960	104,960
h	3,1674	1196,9	1,934	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,5328	1,5543	1,5602	1,5855	1,6056	1,6292	1,6566	1,6830	1,7086	1,7343	1,7591	1,7839	1,8087	1,8334	1,8577
Sh	0,01833	2,4030	5,083	9,868	15,743	19,830	24,420	34,830	44,830	54,830	64,830	74,830	84,830	94,830	104,830
h	3,2034	1197,6	1,934	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,5384	1,5498	1,5557	1,5810	1,6011	1,6247	1,6521	1,6785	1,7050	1,7316	1,7582	1,7848	1,8114	1,8380	1,8645
Sh	0,01839	2,2873	4,967	9,752	15,627	19,710	24,300	34,710	44,710	54,710	64,710	74,710	84,710	94,710	104,710
h	3,2496	1198,3	1,934	4,9786	16,110	4,9009	5,1637	5,6813	6,1528	6,7006	7,2060	7,7096	8,2119	8,7130	9,2134
s	0,5438	1,5454	1,5513	1,5766	1,5967	1,6203	1,6477	1,6751	1,7026	1,7302	1,7578	1,7854	1,8130	1,8406	1,8682

Sh = перегрев, град. по Фаренгейту  
 v = удельный объем, кубич. футов на фунт  
 h = Энтальпия, Вт/фунт  
 s = Энтропия, Вт/град. по Фаренгейту/фунт

ТАБЛИЦА 46.3 Перегретый пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм) (Продолжение)

Абсолютное давление фунтов на кв. дюйм (при насыщении)		Температура в град. по Фаренгейту													
		400	450	500	550	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
710 (385.91)	Sh	14.09	64.09	114.09	164.09	214.09	314.09	414.09	514.09	614.09	714.09	814.09	914.09	1014.09	1114.09
	v	2.2364	2.4181	2.5880	2.7504	2.9078	3.2137	3.5128	3.8080	4.1007	4.3915	4.6811	4.9695	5.2571	5.5440
	s	359.91	1.9540	1.2062	1.2953	1.3219	1.3757	1.4251	1.4767	1.5288	1.5816	1.6352	1.6896	1.7448	1.8008
720 (389.88)	Sh	10.12	60.12	110.12	160.12	210.12	310.12	410.12	510.12	610.12	710.12	810.12	910.12	1010.12	1110.12
	v	0.01850	2.0863	2.1240	2.0999	2.4638	2.7710	3.0942	3.3504	3.6327	3.9125	4.1905	4.4671	4.7426	5.0173
	s	364.17	1.0965	1.0633	1.2663	1.3435	1.3782	1.4247	1.4763	1.5285	1.5814	1.6350	1.6894	1.7447	1.8006
730 (393.70)	Sh	6.30	56.30	106.30	156.30	206.30	306.30	406.30	506.30	606.30	706.30	806.30	906.30	1006.30	1106.30
	v	0.01855	1.9985	2.0212	2.1919	2.3403	2.6935	2.9970	3.2972	3.5936	3.8868	4.1771	4.4656	4.7535	5.0416
	s	368.28	1.2001	1.2044	1.2363	1.2657	1.2936	1.3204	1.3472	1.3740	1.4008	1.4276	1.4544	1.4812	1.5080
740 (397.39)	Sh	2.61	52.61	102.61	152.61	202.61	302.61	402.61	502.61	602.61	702.61	802.61	902.61	1002.61	1102.61
	v	0.01860	1.9177	1.9768	2.0328	2.2462	2.3915	2.8024	3.0661	3.2859	3.5831	3.8385	4.0926	4.3456	4.5977
	s	372.27	1.2006	1.2024	1.2349	1.2646	1.2927	1.3197	1.3471	1.3748	1.4028	1.4311	1.4596	1.4882	1.5169
750 (400.97)	Sh	0.01865	1.8432	2.0016	2.1504	2.2909	2.4262	2.6872	2.9410	3.1909	3.4382	3.6837	3.9278	4.1709	4.4131
	v	376.14	1.2011	1.2334	1.2635	1.2918	1.3190	1.3456	1.3716	1.4023	1.4344	1.4680	1.5044	1.5428	1.5830
	s	0.5679	1.5264	1.5629	1.5951	1.6239	1.6502	1.6976	1.7405	1.7801	1.8173	1.8524	1.8858	1.9177	1.9482
760 (404.44)	Sh	0.01870	1.7742	1.9173	2.0619	2.1981	2.3289	2.5808	2.8256	3.0663	3.3044	3.5408	3.7758	4.0097	4.2427
	v	379.90	1.2015	1.2319	1.2624	1.2909	1.3182	1.3444	1.3700	1.4020	1.4419	1.4844	1.5304	1.5804	1.6344
	s	0.5722	1.5230	1.5573	1.5899	1.6189	1.6453	1.6930	1.7359	1.7756	1.8128	1.8480	1.8814	1.9133	1.9439
770 (407.80)	Sh	0.01875	1.7101	1.8391	1.9799	2.1121	2.2388	2.4824	2.7186	2.9509	3.1806	3.4084	3.6349	3.8603	4.0849
	v	383.56	1.2019	1.2304	1.2580	1.2840	1.3085	1.3316	1.3536	1.3746	1.3946	1.4136	1.4316	1.4486	1.4646
	s	0.5764	1.5197	1.5518	1.5848	1.6140	1.6406	1.6885	1.7315	1.7713	1.8085	1.8437	1.8771	1.9090	1.9396
780 (411.07)	Sh	0.01880	1.6505	1.7665	1.9037	2.0322	2.1551	2.3909	2.6194	2.8437	3.0655	3.2855	3.5042	3.7217	3.9384
	v	387.12	1.2023	1.2288	1.2540	1.2780	1.3008	1.3226	1.3434	1.3632	1.3820	1.4000	1.4170	1.4330	1.4480
	s	0.5805	1.5166	1.5464	1.5798	1.6093	1.6361	1.6841	1.7273	1.7671	1.8043	1.8395	1.8730	1.9050	1.9356

Sh	35.75	85.75	135.75	185.75	285.75	385.75	485.75	585.75	685.75	785.75	885.75	985.75	1085.75
v	1.6988	1.8327	1.9578	2.0772	2.3058	2.5269	2.7440	2.9585	3.1711	3.3824	3.5926	3.8019	4.0106
h	390.60	1202.6	1227.3	1258.9	1288.1	1316.0	1369.5	1421.7	1475.9	1526.5	1633.5	1688.2	1743.6
s	0.5844	1.5135	1.5412	1.5750	1.6048	1.6317	1.6799	1.7232	1.7630	1.8003	1.8650	1.9010	1.9610
Sh	32.65	82.65	132.65	182.65	282.65	382.65	482.65	582.65	682.65	782.65	882.65	982.65	1082.65
v	1.6356	1.7665	1.8883	2.0044	2.2263	2.4407	2.6509	2.8585	3.0643	3.2688	3.4721	3.6746	3.8764
h	393.99	1202.9	1225.7	1257.2	1287.2	1315.2	1368.9	1421.3	1475.6	1526.2	1633.3	1688.0	1743.4
s	0.5882	1.5105	1.5381	1.5703	1.6003	1.6274	1.6758	1.7192	1.7591	1.7964	1.8652	1.8972	1.9572
Sh	29.64	79.64	129.64	179.64	279.64	379.64	479.64	579.64	679.64	779.64	879.64	979.64	1079.64
v	1.5763	1.7044	1.8233	1.9363	2.1520	2.3600	2.5638	2.7650	2.9644	3.1625	3.3594	3.5555	3.7509
h	397.30	1203.2	1224.1	1256.5	1286.3	1314.5	1368.4	1420.9	1473.2	1525.9	1633.1	1687.8	1743.3
s	0.5920	1.5078	1.5311	1.5657	1.5960	1.6233	1.6719	1.7153	1.7553	1.7927	1.8280	1.8935	1.9241
Sh	26.69	76.69	126.69	176.69	276.69	376.69	476.69	576.69	676.69	776.69	876.69	976.69	1076.69
v	1.5207	1.6462	1.7623	1.8725	2.0823	2.2843	2.4821	2.6774	2.8708	3.0638	3.2568	3.4438	3.6332
h	400.53	1203.4	1222.5	1255.2	1285.3	1313.7	1367.8	1420.5	1472.9	1525.6	1632.9	1687.6	1743.1
s	0.5956	1.5048	1.5261	1.5612	1.5918	1.6192	1.6680	1.7116	1.7516	1.7890	1.8243	1.8899	1.9206
Sh	23.82	73.82	123.82	173.82	273.82	373.82	473.82	573.82	673.82	773.82	873.82	973.82	1073.82
v	1.4584	1.5815	1.7050	1.8175	2.0298	2.2332	2.4278	2.6159	2.7978	2.9752	3.1545	3.3389	3.5277
h	403.70	1203.6	1220.9	1254.4	1284.4	1312.3	1367.3	1420.0	1472.5	1525.3	1632.7	1687.5	1742.9
s	0.5991	1.5021	1.5213	1.5588	1.5876	1.6155	1.6643	1.7079	1.7480	1.7855	1.8208	1.8864	1.9171
Sh	21.01	71.01	121.01	171.01	271.01	371.01	471.01	571.01	671.01	771.01	871.01	971.01	1071.01
v	1.4191	1.5399	1.6511	1.7561	1.9552	2.1463	2.3332	2.5175	2.7000	2.8811	3.0611	3.2402	3.4186
h	406.80	1203.8	1219.2	1252.8	1283.4	1312.2	1365.7	1419.6	1472.2	1525.0	1632.5	1687.3	1742.8
s	0.6026	1.4994	1.5165	1.5525	1.5836	1.6114	1.6606	1.7044	1.7445	1.7820	1.8174	1.8831	1.9138
Sh	18.27	68.27	118.27	168.27	268.27	368.27	468.27	568.27	668.27	768.27	868.27	968.27	1068.27
v	1.3775	1.4913	1.6002	1.7028	1.8970	2.0832	2.2652	2.4445	2.6219	2.7980	2.9730	3.1471	3.3205
h	412.81	1204.0	1217.5	1251.5	1282.4	1311.4	1366.2	1419.2	1471.8	1524.7	1632.3	1687.1	1742.6
s	0.6059	1.4968	1.5119	1.5483	1.5797	1.6077	1.6571	1.7009	1.7411	1.7787	1.8141	1.8477	1.9105
Sh	15.59	65.59	115.59	165.59	265.59	365.59	465.59	565.59	665.59	765.59	865.59	965.59	1065.59
v	1.2891	1.3285	1.4454	1.5521	1.6525	1.8421	2.0237	2.2009	2.3755	2.5482	2.7196	2.8898	3.0592
h	418.59	1204.1	1215.8	1250.3	1281.5	1310.6	1365.6	1418.7	1471.5	1524.4	1632.1	1686.9	1742.5
s	0.6092	1.4943	1.5073	1.5441	1.5758	1.6040	1.6536	1.6976	1.7379	1.7754	1.8109	1.8445	1.9073
Sh	10.39	60.39	110.39	160.39	260.39	360.39	460.39	560.39	660.39	760.39	860.39	960.39	1060.39
v	1.2472	1.3606	1.4635	1.5598	1.7410	1.9135	2.0825	2.2484	2.4124	2.5750	2.7366	2.8973	3.0572
h	418.59	1204.4	1212.4	1247.7	1279.5	1309.0	1364.5	1417.9	1470.8	1523.8	1631.6	1686.5	1742.2
s	0.6156	1.4894	1.4982	1.5360	1.5683	1.5969	1.6470	1.6911	1.7315	1.7692	1.8047	1.8384	1.9102

Sh = перетрів, град. по Фаренгейту  
 v = удельний об'єм, кубич. футів на фунт  
 h = Ентальпія, Вт/фунт  
 s = Ентропія, Вт/град. по Фаренгейту/фунт

ТАБЛИЦА 46.3 Перегретый пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм) (Продолжение)

		Температура в град. по Фаренгейту													
		Насы- Насы- центнаяцненный													
		фунтов на кв вода пар													
		дюйм (при													
		температуре													
		насыщения)													
		450	500	550	600	650	700	000	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
400 (444.80)	Sh		55.40	105.40	155.40	205.40	255.40	355.40	455.40	555.40	655.40	755.40	855.40	955.40	1055.40
	v	0.01934	1.1610	1.1738	1.2841	1.3836	1.6499	1.8151	1.9759	2.1339	2.2901	2.4450	2.5987	2.7515	2.9037
	h	424.17	1204.6	1208.8	1245.1	1277.5	1307.4	1337.4	1367.4	1417.0	1523.3	1576.9	1631.2	1741.9	1798.2
420 (449.40)	Sh		60	50.60	100.60	200.60	250.60	350.60	450.60	550.60	650.60	750.60	850.60	950.60	1050.60
	v	0.01942	1.1057	1.1071	1.2148	1.3113	1.4856	1.5676	1.7258	1.8795	2.0304	2.1795	2.3273	2.4739	2.6167
	h	429.56	1204.7	1205.2	1242.4	1275.4	1305.8	1335.3	1365.2	1416.2	1469.4	1522.7	1576.4	1630.8	1741.6
440 (454.03)	Sh		45.97	95.97	145.97	195.97	245.97	345.97	445.97	545.97	645.97	745.97	845.97	945.97	1045.97
	v	0.01950	1.0554	1.1517	1.2454	1.3319	1.4138	1.4926	1.6445	1.7918	1.9363	2.0790	2.2203	2.3605	2.4998
	h	434.77	1204.8	1205.7	1243.4	1276.4	1306.2	1335.7	1365.6	1416.6	1469.8	1523.1	1576.5	1630.4	1741.2
460 (458.50)	Sh		51.32	154.74	157.72	160.40	162.86	167.34	171.42	175.21	178.78	182.16	185.38	188.47	191.43
	v	0.01959	1.0092	1.0839	1.1855	1.2691	1.3482	1.4242	1.5703	1.7117	1.8504	1.9872	2.1226	2.2569	2.3903
	h	439.83	1204.8	1205.9	1243.3	1276.5	1306.0	1335.9	1365.9	1416.9	1469.9	1522.9	1576.4	1630.3	1740.9
480 (462.82)	Sh		41.50	91.50	141.50	191.50	241.50	341.50	441.50	541.50	641.50	741.50	841.50	941.50	1041.50
	v	0.01967	0.9668	1.0409	1.1300	1.2115	1.2881	1.3615	1.5023	1.6384	1.7716	1.9030	2.0330	2.1619	2.2900
	h	444.75	1204.8	1205.1	1242.7	1275.7	1305.3	1335.3	1365.3	1416.3	1469.3	1522.3	1575.9	1629.5	1740.3
500 (467.01)	Sh		44.990	153.46	156.52	159.25	161.76	166.28	170.38	174.19	177.77	181.16	184.39	187.48	190.45
	v	0.01975	0.9276	0.9919	1.0791	1.1584	1.2327	1.3037	1.4397	1.5708	1.6992	1.8256	1.9507	2.0746	2.1977
	h	449.52	1204.7	1204.2	1242.2	1275.2	1304.8	1334.8	1364.8	1415.7	1468.6	1521.4	1574.4	1627.1	1737.9
520 (471.07)	Sh		78.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93	178.93
	v	0.01982	0.8914	0.9466	1.0321	1.1094	1.1816	1.2504	1.3819	1.5085	1.6333	1.7542	1.8746	1.9940	2.1125
	h	454.18	1204.5	1204.3	1242.3	1275.4	1304.9	1334.9	1364.9	1415.9	1468.9	1521.9	1574.9	1627.9	1738.7
540 (475.01)	Sh		24.99	74.99	124.99	174.99	224.99	324.99	424.99	524.99	624.99	724.99	824.99	924.99	1024.99
	v	0.01990	0.8577	0.9045	0.9894	1.0640	1.1342	1.2010	1.3284	1.4508	1.5704	1.6880	1.8042	1.9193	2.0336
	h	458.71	1204.4	1204.2	1242.2	1275.3	1304.8	1334.8	1364.8	1415.8	1468.8	1521.8	1574.8	1627.8	1738.6

ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

566 (478.84)	Sh h s	0.01998 463.14 0.66534	0.82664 1204.2 1.46229	121.16 1021.7 1.5106	171.16 1090.2 1.324.9	221.16 1155.2 1.5975	321.16 1218.7 1.6438	421.16 1292.2 1.6853	521.16 1366.5 1.7237	621.16 1435.2 1.7598	721.16 1503.7 1.7939	821.16 1571.8 1.8283	921.16 1640.3 1.8573	1021.16 1708.8 1.8870
566 (482.57)	Sh h s	0.02006 467.47 0.66779	0.79371 1203.9 1.4495	171.43 1049.2 1.5380	217.43 1125.2 1.5668	317.43 1209.2 1.5929	417.43 1283.4 1.6394	517.43 1357.8 1.6811	617.43 1432.4 1.7195	717.43 1507.4 1.7556	817.43 1582.9 1.7898	917.43 1659.9 1.8223	1017.43 1731.1 1.8533	1117.43 1809.4 1.8831
600 (486.20)	Sh h s	0.02013 471.70 0.67223	0.76977 1203.7 1.4461	173.80 1019.9 1.5329	213.80 1072.6 1.5621	313.80 1148.2 1.5884	413.80 1225.8 1.6351	513.80 1309.8 1.6818	613.80 1396.8 1.7195	713.80 1490.2 1.7517	813.80 1592.9 1.7859	913.80 1700.4 1.8184	1013.80 1826.4 1.8494	1113.80 1971.9 1.8792
650 (494.88)	Sh h s	0.02032 481.89 0.68228	0.70884 1202.8 1.4381	155.11 983.5 1.5207	205.11 1063.5 1.5507	305.11 1155.2 1.5884	405.11 1259.8 1.6351	505.11 1372.4 1.6818	605.11 1492.4 1.7195	705.11 1620.9 1.7517	805.11 1765.9 1.7859	905.11 1926.4 1.8184	1005.11 2104.9 1.8494	1105.11 2311.9 1.8792
700 (503.08)	Sh h s	0.02050 491.60 0.69328	0.65556 1201.8 1.4304	146.92 952.8 1.5089	196.92 1042.8 1.5399	296.92 1148.2 1.5884	396.92 1269.8 1.6351	496.92 1407.4 1.6818	596.92 1592.4 1.7195	696.92 1731.9 1.7517	796.92 1892.4 1.7859	896.92 2079.9 1.8184	996.92 2296.4 1.8494	1096.92 2544.9 1.8792
750 (510.84)	Sh h s	0.02069 500.89 0.70222	0.60995 1200.2 1.4232	139.16 921.3 1.4977	189.16 1017.3 1.5296	289.16 1125.8 1.5884	389.16 1246.8 1.6351	489.16 1392.4 1.6818	589.16 1565.4 1.7195	689.16 1759.9 1.7517	789.16 1962.4 1.7859	889.16 2209.9 1.8184	989.16 2494.9 1.8494	1089.16 2826.4 1.8792
800 (518.21)	Sh h s	0.02087 509.81 0.71111	0.56990 1199.4 1.4163	131.79 887.3 1.4869	181.79 982.8 1.5198	281.79 1092.4 1.5884	381.79 1219.8 1.6351	481.79 1372.4 1.6818	581.79 1517.4 1.7195	681.79 1762.4 1.7517	781.79 1999.9 1.7859	881.79 2292.4 1.8184	981.79 2649.9 1.8494	1081.79 3076.4 1.8792
850 (525.24)	Sh h s	0.02105 518.40 0.71917	0.53330 1198.0 1.4096	124.76 862.9 1.4763	174.76 962.9 1.5096	274.76 1079.8 1.5884	374.76 1219.8 1.6351	474.76 1392.4 1.6818	574.76 1617.4 1.7195	674.76 1872.4 1.7517	774.76 2159.9 1.7859	874.76 2489.9 1.8184	974.76 2854.9 1.8494	1074.76 3282.4 1.8792
900 (531.95)	Sh h s	0.02123 526.70 0.72729	0.50009 1196.4 1.4032	118.05 846.8 1.4659	168.05 962.8 1.5010	268.05 1092.4 1.5884	368.05 1239.8 1.6351	468.05 1407.4 1.6818	568.05 1582.4 1.7195	668.05 1839.9 1.7517	768.05 2142.4 1.7859	868.05 2429.9 1.8184	968.05 2754.9 1.8494	1068.05 3126.4 1.8792

Sh = перетегв, град. по Фаренгейту  
 v = удельный объем, кубяч. футов на фунт  
 h = Энтальпия, Вту/фунт  
 s = Энтропия, Вту/град. по Фаренгейту/фунт

ТАБЛИЦА 4.3 Перетретый пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм) (Продолжение)

Абсолютное давление фунтов на кв. дюйм (при температуре насыщения)		Температура в град. по Фаренгейту													
		550	600	650	700	750	800	850	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
650 (538.39)	Sh	11.61	61.61	111.61	161.61	211.61	261.61	311.61	361.61	461.61	561.61	661.61	761.61	861.61	961.61
	v	0.4721	0.4883	0.5485	0.5993	0.6449	0.6871	0.7272	0.7656	0.8030	0.8353	0.8625	0.8851	0.9034	0.9181
	s	534.74	1194.7	2075.1	2944.3	3329.3	3550.1	3727.0	3875.0	4000.0	4100.0	4180.0	4245.0	4295.0	4335.0
1600 (544.58)	Sh	5.42	55.42	105.42	155.42	205.42	255.42	305.42	355.42	455.42	555.42	655.42	755.42	855.42	955.42
	v	0.02159	0.4460	0.4535	0.5137	0.5636	0.6080	0.6489	0.6875	0.7245	0.7603	0.7956	0.8302	0.8641	0.8973
	s	743.4	1391.0	1997.3	2551.3	3051.3	3501.3	3911.3	4281.3	4611.3	4901.3	5151.3	5371.3	5561.3	5721.3
1950 (550.53)	Sh	49.47	99.47	149.47	199.47	249.47	299.47	349.47	399.47	449.47	549.47	649.47	749.47	849.47	949.47
	v	0.02177	0.4222	0.4821	0.5312	0.5745	0.6142	0.6515	0.6872	0.7216	0.7548	0.7870	0.8181	0.8481	0.8773
	s	750.7	1385.1	2033.4	2685.7	3243.4	3715.8	4103.2	4405.2	4622.2	4755.2	4805.2	4845.2	4875.2	4900.2
1100 (556.28)	Sh	43.72	93.72	143.72	193.72	243.72	293.72	343.72	393.72	443.72	543.72	643.72	743.72	843.72	943.72
	v	0.02195	0.4006	0.4531	0.5017	0.5440	0.5826	0.6188	0.6533	0.6865	0.7185	0.7495	0.7795	0.8084	0.8361
	s	757.8	1379.4	2037.3	2701.2	3271.2	3747.2	4130.2	4420.2	4617.2	4720.2	4735.2	4745.2	4751.2	4757.2
1150 (561.82)	Sh	39.18	89.18	139.18	189.18	239.18	289.18	339.18	389.18	439.18	539.18	639.18	739.18	839.18	939.18
	v	0.02214	0.3807	0.4263	0.4746	0.5162	0.5538	0.5886	0.6223	0.6548	0.6861	0.7164	0.7457	0.7740	0.8013
	s	764.7	1373.8	2030.9	2705.6	3295.6	3795.6	4205.6	4525.6	4755.6	4895.6	4945.6	4960.6	4965.6	4970.6
1200 (567.19)	Sh	32.81	82.81	132.81	182.81	232.81	282.81	332.81	382.81	432.81	532.81	632.81	732.81	832.81	932.81
	v	0.02232	0.3624	0.4016	0.4497	0.4905	0.5273	0.5615	0.5939	0.6250	0.6548	0.6835	0.7111	0.7377	0.7634
	s	771.4	1368.3	2034.0	2721.8	3321.5	3831.5	4251.5	4581.5	4821.5	4971.5	5031.5	5051.5	5061.5	5071.5
1300 (577.42)	Sh	22.58	72.58	122.58	172.58	222.58	272.58	322.58	372.58	422.58	522.58	622.58	722.58	822.58	922.58
	v	0.02269	0.3299	0.3570	0.4052	0.4451	0.4804	0.5129	0.5436	0.5729	0.6008	0.6277	0.6535	0.6784	0.7024
	s	784.3	1357.7	2036.0	2739.9	3359.9	3909.9	4389.9	4789.9	5109.9	5359.9	5529.9	5619.9	5689.9	5739.9
1400 (587.07)	Sh	12.93	62.93	112.93	162.93	212.93	262.93	312.93	362.93	412.93	512.93	612.93	712.93	812.93	912.93
	v	0.02307	0.3018	0.3176	0.3667	0.4059	0.4400	0.4712	0.5004	0.5282	0.5549	0.5805	0.6051	0.6287	0.6514
	s	796.6	1347.4	2041.1	2765.1	3415.1	3995.1	4505.1	4945.1	5305.1	5585.1	5785.1	5905.1	5985.1	6045.1

ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

1500	Sh	0,02346	0,2772	3,80	53,80	103,80	153,80	203,80	253,80	303,80	403,80	503,80	603,80	703,80	803,80	903,80
(596,20)	v	611,68	1170,1	0,2820	0,3328	0,3717	0,4049	0,4350	0,4629	0,4894	0,5169	0,5427	0,5677	0,5920	0,6158	0,6391
	h	524,20	1164,5	1176,3	1240,2	1287,9	1328,0	1364,0	1397,4	1429,2	1459,1	1487,9	1515,6	1542,3	1568,0	1592,7
	s	0,8085	1,3373	1,3431	1,4022	1,4443	1,4782	1,5073	1,5333	1,5572	1,6004	1,6395	1,6759	1,7101	1,7425	1,7734
1600	Sh	0,02387	0,2555	45,13	95,13	145,13	195,13	245,13	295,13	395,15	495,13	595,13	695,13	795,13	895,13	
(604,87)	v	624,20	1164,5	0,3076	0,3415	0,3741	0,4032	0,4301	0,4555	0,4803	0,5042	0,5271	0,5491	0,5701	0,5911	
	h	524,20	1164,5	1228,3	1279,4	1321,4	1358,5	1392,8	1425,2	1456,9	1487,9	1518,3	1548,2	1577,7	1606,7	
	s	0,8199	1,3274	1,3861	1,4312	1,4667	1,4968	1,5235	1,5478	1,5716	1,6312	1,6678	1,7022	1,7347	1,7657	
1700	Sh	0,02428	0,2361	36,87	86,87	136,87	186,87	236,87	286,87	386,87	486,87	586,87	686,87	786,87	886,87	
(613,13)	v	636,45	1158,6	0,2754	0,3147	0,3468	0,3751	0,4011	0,4255	0,4491	0,4711	0,4916	0,5107	0,5284	0,5448	
	h	548,49	1152,3	1215,3	1270,5	1314,5	1352,9	1388,1	1421,2	1453,8	1485,4	1516,0	1545,6	1574,3	1602,1	
	s	0,8309	1,3176	1,3697	1,4183	1,4655	1,4867	1,5140	1,5388	1,5633	1,6232	1,6601	1,6947	1,7274	1,7585	
1800	Sh	0,02472	0,2186	28,98	78,98	128,98	178,98	228,98	278,98	378,98	478,98	578,98	678,98	778,98	878,98	
(621,02)	v	648,49	1152,3	0,2505	0,2906	0,3223	0,3500	0,3752	0,3988	0,4216	0,4436	0,4636	0,4816	0,4986	0,5146	
	h	562,49	1145,6	1201,2	1261,1	1307,4	1347,2	1383,3	1417,1	1450,6	1482,6	1514,1	1545,1	1574,6	1603,6	
	s	0,8417	1,3079	1,3526	1,4054	1,4446	1,4768	1,5049	1,5302	1,5573	1,6156	1,6528	1,6876	1,7204	1,7516	
1900	Sh	0,02516	0,2028	21,44	71,44	121,44	171,44	221,44	271,44	371,44	471,44	571,44	671,44	771,44	871,44	
(628,56)	v	660,36	1145,6	0,2274	0,2687	0,3004	0,3275	0,3521	0,3749	0,3961	0,4156	0,4336	0,4501	0,4656	0,4801	
	h	580,36	1138,3	1185,7	1251,3	1300,2	1341,4	1378,4	1412,9	1447,4	1481,8	1516,2	1550,6	1585,0	1619,4	
	s	0,8522	1,2981	1,3346	1,3925	1,4338	1,4672	1,4960	1,5219	1,5477	1,6084	1,6458	1,6808	1,7138	1,7451	
2000	Sh	0,02565	0,1883	14,20	64,20	114,20	164,20	214,20	264,20	364,20	464,20	564,20	664,20	764,20	864,20	
(635,80)	v	672,11	1138,3	0,2056	0,2488	0,2805	0,3072	0,3312	0,3534	0,3742	0,3927	0,4099	0,4259	0,4407	0,4545	
	h	600,36	1131,0	1168,3	1240,9	1292,6	1335,4	1373,5	1408,7	1441,1	1472,6	1503,2	1532,9	1561,7	1589,6	
	s	0,8625	1,2881	1,3154	1,3794	1,4231	1,4578	1,4874	1,5138	1,5363	1,6014	1,6391	1,6743	1,7075	1,7389	
2100	Sh	0,02615	0,1750	7,24	57,24	107,24	157,24	207,24	257,24	357,24	457,24	557,24	657,24	757,24	857,24	
(642,76)	v	683,79	1130,5	0,1847	0,2304	0,2624	0,2888	0,3173	0,3379	0,3574	0,3750	0,3909	0,4054	0,4188	0,4312	
	h	620,76	1123,2	1148,5	1220,8	1284,9	1329,3	1368,4	1404,4	1439,9	1474,9	1509,4	1543,4	1576,9	1610,9	
	s	0,8727	1,2780	1,2942	1,3661	1,4125	1,4486	1,4790	1,5060	1,5332	1,5948	1,6327	1,6681	1,7014	1,7330	
2200	Sh	0,02669	0,1627	55	50,55	100,55	150,55	200,55	250,55	350,55	450,55	550,55	650,55	750,55	850,55	
(649,45)	v	695,46	1122,2	0,1636	0,2134	0,2458	0,2720	0,2950	0,3161	0,3354	0,3530	0,3689	0,3831	0,3959	0,4082	
	h	649,45	1114,9	1173,9	1248,0	1276,8	1323,1	1363,3	1400,0	1437,3	1474,4	1511,3	1548,0	1584,5	1620,9	
	s	0,8828	1,2676	1,2691	1,3523	1,4020	1,4395	1,4708	1,4984	1,5233	1,5883	1,6266	1,6622	1,6956	1,7273	
2300	Sh	0,02727	0,1513	44,11	94,11	144,11	194,11	244,11	294,11	344,11	444,11	544,11	644,11	744,11	844,11	
(655,89)	v	707,18	1113,2	0,1575	0,2105	0,2305	0,2566	0,2793	0,2999	0,3174	0,3328	0,3474	0,3603	0,3718	0,3822	
	h	665,89	1105,9	1205,3	1268,4	1316,7	1358,1	1395,7	1430,4	1462,1	1492,8	1522,5	1551,2	1578,9	1605,6	
	s	0,8929	1,2569	1,3381	1,3914	1,4230	1,4628	1,4910	1,5167	1,5397	1,5821	1,6207	1,6555	1,6901	1,7219	

h = Энтальпия, Вт/фунт  
s = Энтропия, Вт/град. по Фаренгейту/фунт

Sh = перегрев, град. по Фаренгейту  
v = удельный объем, кубич. футов на фунт

ТАБЛИЦА 46.3 Перегретый пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм) (Продолжение)

Абсолютное давление насыщенного пара на кв. дюйм (при температуре насыщения)		Температура в град. по Фаренгейту														
		700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1300	1400	1500	
2400 (662.11)	Sh	37.89	87.89	137.89	187.89	237.89	287.89	337.89	387.89	437.89	487.89	537.89	637.89	737.89	837.89	
	v	0.02790	0.1408	0.1824	0.2164	0.2424	0.2648	0.2850	0.3037	0.3214	0.3382	0.3545	0.3856	0.4443	0.4724	
	s	718.95	1103.7	1191.6	1259.7	1310	1352.8	1391.2	1426.9	1460.9	1493.7	1525.6	1557.0	1588.1	1649.6	1711.8
2500 (668.11)	Sh	0.9031	1.2460	1.3232	1.3808	1.4217	1.4549	1.4837	1.5095	1.5332	1.5553	1.5761	1.5959	1.6149	1.6509	1.7167
	v	0.07859	0.1307	0.1681	0.2032	0.2354	0.2712	0.2986	0.3232	0.3458	0.3665	0.3852	0.3980	0.4259	0.4528	
	s	731.71	1093.3	1176.7	1250.6	1303.4	1347.4	1386.7	1423.1	1457.5	1490.7	1522.9	1554.6	1585.9	1647.8	1710.4
2000 (672.91)	Sh	26.09	76.09	126.09	176.09	226.09	276.09	326.09	376.09	426.09	476.09	526.09	626.09	726.09	826.09	
	v	0.07938	0.1211	0.1544	0.1909	0.2171	0.2390	0.2585	0.2765	0.2933	0.3083	0.3219	0.3350	0.3488	0.4350	
	s	744.47	1082.0	1160.2	1241.1	1296.5	1341.9	1382.1	1419.2	1454.1	1487.7	1520.2	1552.2	1583.7	1646.0	1707.7
2100 (679.53)	Sh	20.47	70.47	120.47	170.47	220.47	270.47	320.47	370.47	420.47	470.47	520.47	620.47	720.47	820.47	
	v	0.03029	0.1119	0.1411	0.1794	0.2058	0.2275	0.2468	0.2644	0.2809	0.2965	0.3114	0.3259	0.3399	0.3670	
	s	0.9356	1.2097	1.2777	1.3481	1.3954	1.4319	1.4628	1.4900	1.5148	1.5376	1.5591	1.5794	1.5988	1.6355	1.6697
2600 (684.96)	Sh	15.04	65.04	115.04	165.04	215.04	265.04	315.04	365.04	415.04	465.04	515.04	615.04	715.04	815.04	
	v	0.03134	0.1030	0.1278	0.1685	0.1952	0.2168	0.2358	0.2531	0.2693	0.2845	0.2991	0.3132	0.3268	0.3532	
	s	770.69	1055.8	1121.2	1206.6	1282.2	1350.7	1412.2	1472.2	1530.7	1588.6	1644.1	1701.5	1761.8	1824.5	
2900 (690.22)	Sh	9.78	59.78	109.78	159.78	209.78	259.78	309.78	359.78	409.78	459.78	509.78	609.78	709.78	809.78	
	v	0.03262	0.0942	0.1138	0.1581	0.1853	0.2068	0.2256	0.2427	0.2585	0.2734	0.2877	0.3014	0.3147	0.3387	
	s	0.9588	1.1803	1.2283	1.2851	1.3270	1.3632	1.3949	1.4229	1.4477	1.4694	1.4885	1.5059	1.5214	1.5462	
3000 (695.33)	Sh	4.67	54.67	104.67	154.67	204.67	254.67	304.67	354.67	404.67	454.67	504.67	604.67	704.67	804.67	
	v	0.03428	0.0850	0.0982	0.1483	0.1759	0.1975	0.2161	0.2329	0.2484	0.2630	0.2770	0.2904	0.3033	0.3282	
	s	0.9728	1.1619	1.1966	1.2609	1.2970	1.3270	1.3523	1.3732	1.3903	1.4042	1.4159	1.4254	1.4334	1.4404	
3100 (700.28)	Sh	49.72	99.72	149.72	199.72	249.72	299.72	349.72	399.72	449.72	499.72	549.72	649.72	749.72	849.72	
	v	0.03681	0.0745	0.0889	0.1671	0.1887	0.2071	0.2237	0.2390	0.2533	0.2670	0.2800	0.2927	0.3053	0.3282	
	s	0.9914	1.1373	1.1864	1.2519	1.3130	1.3584	1.3990	1.4367	1.4723	1.5066	1.5399	1.5726	1.6053	1.6378	

ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

3200 (705.08)	Sh	0.0447?	0.0566	44.92	94.92	144.92	194.92	244.92	294.92	344.92	394.92	444.92	494.92	544.92	594.92	644.92	694.92	744.92		
	v	0.1300	0.1588	0.1804	0.1987	0.2151	0.2301	0.2442	0.2576	0.2704	0.2827	0.2946	0.3065	0.3181	0.3297	0.3411	0.3524	0.3636		
	h	1.1723	1.2509	1.3069	1.3534	1.3949	1.4331	1.4692	1.5038	1.5374	1.5703	1.6028	1.6348	1.6663	1.6974	1.7281	1.7584	1.7884	1.8181	
3300	Sh	0.1213	0.1510	0.1727	0.1908	0.2070	0.2218	0.2357	0.2488	0.2613	0.2734	0.2851	0.2966	0.3081	0.3194	0.3306	0.3417	0.3527	0.3636	
	v	1.1582	1.2425	1.3007	1.3484	1.3907	1.4295	1.4661	1.5010	1.5349	1.5681	1.6008	1.6329	1.6645	1.6957	1.7265	1.7569	1.7869	1.8166	1.8461
	h	1.2742	1.3425	1.3879	1.4237	1.4542	1.4813	1.5059	1.5287	1.5501	1.5704	1.5898	1.6084	1.6263	1.6436	1.6604	1.6767	1.6925	1.7079	1.7229
3400	Sh	0.1129	0.1435	0.1653	0.1834	0.1994	0.2140	0.2276	0.2405	0.2528	0.2646	0.2761	0.2872	0.2981	0.3088	0.3194	0.3299	0.3403	0.3506	0.3608
	v	1.4322	1.7337	1.7943	1.8434	1.8864	1.9259	1.9629	1.9983	2.0324	2.0658	2.0986	2.1309	2.1627	2.1941	2.2251	2.2558	2.2862	2.3163	2.3461
	h	1.2600	1.3334	1.3807	1.4174	1.4486	1.4761	1.5010	1.5240	1.5456	1.5660	1.5854	1.6038	1.6213	1.6380	1.6541	1.6697	1.6850	1.6999	1.7146
3500	Sh	0.1048	0.1364	0.1583	0.1764	0.1922	0.2066	0.2200	0.2326	0.2447	0.2563	0.2674	0.2781	0.2886	0.2989	0.3091	0.3192	0.3292	0.3391	0.3489
	v	1.1271	1.2246	1.2878	1.3382	1.3822	1.4222	1.4597	1.4953	1.5299	1.5636	1.5964	1.6282	1.6591	1.6892	1.7186	1.7472	1.7751	1.8023	1.8288
	h	1.2450	1.3242	1.3734	1.4112	1.4430	1.4709	1.4962	1.5194	1.5412	1.5618	1.5814	1.6002	1.6182	1.6358	1.6530	1.6697	1.6861	1.7022	1.7179
3600	Sh	0.0866	0.1296	0.1517	0.1697	0.1854	0.1996	0.2128	0.2252	0.2371	0.2485	0.2598	0.2702	0.2802	0.2908	0.3008	0.3106	0.3203	0.3299	0.3394
	v	1.1086	1.2153	1.2812	1.3330	1.3779	1.4186	1.4565	1.4926	1.5274	1.5613	1.5942	1.6273	1.6598	1.6919	1.7236	1.7550	1.7861	1.8169	1.8474
	h	1.2281	1.3148	1.3662	1.4050	1.4374	1.4658	1.4914	1.5149	1.5369	1.5576	1.5772	1.5958	1.6136	1.6307	1.6472	1.6633	1.6790	1.6944	1.7096
3600	Sh	0.0799	0.1169	0.1395	0.1574	0.1729	0.1868	0.1996	0.2116	0.2231	0.2340	0.2445	0.2549	0.2651	0.2751	0.2849	0.2946	0.3042	0.3137	0.3231
	v	1.0642	1.1955	1.2676	1.3274	1.3691	1.4112	1.4501	1.4870	1.5224	1.5568	1.5903	1.6236	1.6568	1.6899	1.7229	1.7557	1.7884	1.8209	1.8533
	h	1.1888	1.2955	1.3517	1.3928	1.4265	1.4558	1.4821	1.5061	1.5284	1.5495	1.5695	1.5886	1.6070	1.6247	1.6418	1.6584	1.6748	1.6909	1.7068
4000	Sh	0.0631	0.1052	0.1284	0.1463	0.1616	0.1752	0.1877	0.1994	0.2105	0.2210	0.2311	0.2411	0.2509	0.2606	0.2701	0.2794	0.2886	0.2977	0.3068
	v	1.0074	1.1743	1.2534	1.3116	1.3602	1.4036	1.4431	1.4790	1.5123	1.5441	1.5754	1.6062	1.6366	1.6666	1.6963	1.7257	1.7548	1.7836	1.8122
	h	1.1396	1.2754	1.3371	1.3807	1.4158	1.4461	1.4730	1.4976	1.5203	1.5417	1.5622	1.5821	1.6014	1.6201	1.6383	1.6560	1.6733	1.6902	1.7068
4200	Sh	0.0498	0.0945	0.1183	0.1362	0.1513	0.1647	0.1769	0.1883	0.1991	0.2093	0.2193	0.2291	0.2387	0.2481	0.2574	0.2666	0.2757	0.2847	0.2936
	v	0.9501	1.1516	1.2386	1.3004	1.3512	1.3960	1.4371	1.4755	1.5122	1.5476	1.5819	1.6152	1.6476	1.6791	1.7098	1.7397	1.7688	1.7971	1.8246
	h	1.0905	1.2344	1.3223	1.3686	1.4053	1.4366	1.4642	1.4893	1.5124	1.5341	1.5548	1.5746	1.5935	1.6117	1.6293	1.6465	1.6633	1.6798	1.6961
4400	Sh	0.0421	0.0846	0.1090	0.1270	0.1420	0.1552	0.1671	0.1782	0.1887	0.1986	0.2081	0.2174	0.2265	0.2354	0.2442	0.2529	0.2614	0.2698	0.2781
	v	0.9095	1.1273	1.2233	1.2830	1.3420	1.3883	1.4304	1.4697	1.5071	1.5430	1.5776	1.6111	1.6436	1.6752	1.7059	1.7357	1.7646	1.7926	1.8200
	h	1.0556	1.2325	1.3073	1.3566	1.3949	1.4272	1.4556	1.4812	1.5048	1.5268	1.5476	1.5674	1.5863	1.6044	1.6218	1.6387	1.6553	1.6717	1.6880

Sh = перегрев, град. по Фаренгейту  
 v = удельный объем, кубич. футов на фунт  
 h = Энтальпия, Вту/фунт  
 s = Энтропия, Вту/град. по Фаренгейту/фунт



6500	v	0,0287	0,0358	0,0495	0,0655	0,0793	0,0909	0,1012	0,1104	0,1188	0,1266	0,1340	0,1411	0,1544	0,1669
	h	813,9	919,5	1046,7	1156,3	1237,8	1302,7	1358,1	1407,3	1452,2	1494,2	1534,1	1572,5	1646,4	1717,6
	s	0,9661	1,0515	1,1506	1,2328	1,2917	1,3370	1,3743	1,4064	1,4347	1,4592	1,4804	1,4981	1,5062	1,5471
7000	Sh	0,0279	0,0334	0,0438	0,0573	0,0704	0,0816	0,0915	0,1004	0,1085	0,1160	0,1231	0,1298	0,1424	0,1542
	v	806,9	901,8	1016,5	1124,9	1212,6	1281,7	1340,5	1392,2	1439,1	1482,6	1523,7	1563,6	1638,6	1711,1
	s	0,9582	1,0350	1,1243	1,2055	1,2689	1,3171	1,3567	1,3904	1,4200	1,4466	1,4710	1,4938	1,5355	1,5735
7500	Sh	0,0272	0,0318	0,0399	0,0512	0,0631	0,0737	0,0833	0,0918	0,0996	0,1068	0,1136	0,1200	0,1321	0,1433
	v	801,3	893,0	992,9	1097,7	1188,3	1261,0	1322,9	1377,2	1426,0	1471,0	1513,3	1553,7	1630,8	1704,6
	s	0,9514	1,0224	1,1033	1,1818	1,2473	1,2980	1,3397	1,3751	1,4059	1,4335	1,4586	1,4819	1,5245	1,5632
8500	Sh	0,0267	0,0306	0,0371	0,0465	0,0571	0,0671	0,0762	0,0845	0,0920	0,0989	0,1054	0,1115	0,1230	0,1338
	v	796,6	879,1	974,4	1074,3	1165,4	1241,0	1305,5	1362,2	1413,0	1459,6	1503,1	1544,5	1623,1	1698,1
	s	0,9455	1,0122	1,0864	1,1613	1,2271	1,2798	1,3233	1,3603	1,3924	1,4208	1,4467	1,4705	1,5140	1,5533
9500	Sh	0,0262	0,0296	0,0350	0,0429	0,0522	0,06, -5	0,0701	0,0780	0,0853	0,0919	0,0982	0,1041	0,1151	0,1254
	v	792,7	871,2	959,8	1054,5	1144,0	1221,9	1288,5	1347,5	1400,2	1448,2	1492,9	1535,3	1615,4	1691,7
	s	0,9402	1,0037	1,0727	1,1437	1,2084	1,2627	1,3076	1,3460	1,3793	1,4087	1,4352	1,4597	1,5040	1,5439
9500	Sh	0,0258	0,0288	0,0335	0,0402	0,0483	0,0568	0,0649	0,0724	0,0794	0,0858	0,0918	0,0975	0,1081	0,1179
	v	789,3	864,7	948,0	1037,6	1125,4	1204,1	1277,1	1333,0	1387,5	1437,1	1482,9	1526,3	1607,9	1685,3
	s	0,9354	0,9964	1,0613	1,1285	1,1918	1,2468	1,2926	1,3323	1,3667	1,3970	1,4243	1,4492	1,4944	1,5349
9500	Sh	0,0254	0,0282	0,0322	0,0380	0,0451	0,0528	0,0603	0,0675	0,0742	0,0804	0,0862	0,0917	0,1019	0,1113
	v	785,4	859,2	938,1	1022,4	1108,9	1187,7	1256,6	1318,9	1375,1	1426,1	1473,1	1517,3	1600,4	1679,0
	s	0,9310	0,9900	1,0516	1,1153	1,1771	1,2370	1,2926	1,3391	1,3794	1,4137	1,4432	1,4681	1,5130	1,5563
10000	Sh	0,0251	0,0276	0,0312	0,0362	0,0425	0,0499	0,0565	0,0633	0,0697	0,0757	0,0812	0,0865	0,0963	0,1054
	v	783,8	854,5	930,2	1011,3	1094,2	1172,6	1242,0	1305,3	1362,9	1415,3	1463,4	1508,6	1593,1	1672,8
	s	0,9270	0,9842	1,0432	1,1039	1,1638	1,2185	1,2652	1,3065	1,3429	1,3749	1,4035	1,4295	1,4763	1,5180
10000	Sh	0,0248	0,0271	0,0303	0,0347	0,0404	0,0467	0,0532	0,0595	0,0656	0,0714	0,0768	0,0818	0,0913	0,1001
	v	781,5	850,5	923,4	1001,0	1081,3	1158,9	1228,4	1292,4	1351,1	1404,7	1453,9	1500,0	1585,8	1666,7
	s	0,9232	0,9790	1,0358	1,0939	1,1519	1,2060	1,2529	1,2946	1,3371	1,3644	1,3937	1,4202	1,4677	1,5100

h = перетрзв, град. по Фаренгейту  
 v = удельный объем, кубич. футов на фунт  
 s = Энтропия, Вып/град. по Фаренгейту/фунт

ТАБЛИЦА 46.3 Перегретый пар (абсолютное давление от 1 до 15500 фунтов на кв. дюйм) (Продолжение)

		Температура в град. по Фаренгейту														
Абсолютное давление насыщенного пара в фунтов на кв. дюйм (при насыщении)		000	050	500	900	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1400	1500		
11000	v	0.0245	0.0267	0.0296	0.0335	0.0386	0.0443	0.0503	0.0562	0.6270	0.6676	0.7076	0.0858	0.0952		
	h	779.5	846.9	917.5	992.1	1069.9	1146.3	1215.9	1280.7	1349.4	1412.6	1481.5	1578.7	1650.6		
	s	0.9196	0.9742	1.0292	1.0851	1.1412	1.1945	1.2414	1.2833	1.3209	1.3544	1.3842	1.4112	1.4395		
11500	v	0.0243	0.0263	0.0290	0.0325	0.0370	0.0428	0.0478	0.0538	0.0641	0.0691	0.0739	0.0827	0.0909		
	h	777.7	843.8	912.4	984.5	1059.8	1134.9	1204.3	1268.8	1328.4	1383.4	1435.2	1521.8	1648.8		
	s	0.9163	0.9698	1.0232	1.0772	1.1316	1.1840	1.2308	1.2727	1.3107	1.3446	1.3750	1.4025	1.4299		
12000	v	0.0241	0.0260	0.0284	0.0317	0.0357	0.0405	0.0456	0.0508	0.0610	0.0659	0.0704	0.0790	0.0869		
	h	776.1	841.0	907.9	977.8	1050.9	1124.5	1193.7	1258.0	1318.5	1374.7	1426.6	1516.9	1648.8		
	s	0.9131	0.9657	1.0177	1.0701	1.1229	1.1745	1.2209	1.2627	1.3010	1.3353	1.3662	1.3941	1.4187		
12500	v	0.0238	0.0256	0.0279	0.0309	0.0346	0.0390	0.0437	0.0486	0.0583	0.0629	0.0673	0.0756	0.0832		
	h	774.7	838.6	903.9	971.9	1041.1	1115.2	1184.1	1247.9	1308.8	1365.4	1418.0	1467.2	1558.2		
	s	0.9101	0.9618	1.0127	1.0637	1.1151	1.1653	1.2117	1.2534	1.2918	1.3264	1.3576	1.3860	1.4108		
13000	v	0.0236	0.0253	0.0275	0.0302	0.0336	0.0376	0.0420	0.0466	0.0562	0.0607	0.0654	0.0735	0.0799		
	h	773.5	836.3	900.4	966.8	1036.2	1106.7	1174.8	1238.5	1299.5	1356.5	1409.6	1459.4	1551.6		
	s	0.9073	0.9582	1.0080	1.0578	1.1079	1.1571	1.2030	1.2445	1.2831	1.3179	1.3494	1.3781	1.4041		
13500	v	0.0235	0.0251	0.0271	0.0297	0.0328	0.0364	0.0405	0.0448	0.0492	0.0535	0.0577	0.0656	0.0716		
	h	772.3	834.4	897.2	962.2	1030.0	1099.1	1166.3	1229.7	1291.0	1348.1	1401.5	1451.2	1531.9		
	s	0.9045	0.9548	1.0037	1.0524	1.1014	1.1495	1.1948	1.2361	1.2749	1.3098	1.3415	1.3705	1.4221		
14000	v	0.0233	0.0248	0.0267	0.0291	0.0320	0.0354	0.0392	0.0432	0.0474	0.0515	0.0555	0.0620	0.0740		
	h	771.3	832.6	894.3	958.0	1024.5	1092.3	1158.5	1221.4	1283.0	1340.2	1393.8	1444.4	1538.8		
	s	0.9019	0.9515	0.9996	1.0473	1.0953	1.1426	1.1872	1.2282	1.2671	1.3021	1.3339	1.3631	1.4153		
14500	v	0.0231	0.0246	0.0264	0.0287	0.0314	0.0345	0.0380	0.0418	0.0458	0.0496	0.0534	0.0573	0.0646		
	h	770.4	831.0	891.7	954.3	1019.6	1086.2	1151.4	1213.8	1275.4	1332.9	1386.4	1437.3	1532.6		
	s	0.8994	0.9484	0.9957	1.0426	1.0897	1.1362	1.1801	1.2208	1.2597	1.2949	1.3266	1.3560	1.4087		
15000	v	0.0230	0.0244	0.0261	0.0283	0.0308	0.0337	0.0369	0.0405	0.0443	0.0479	0.0516	0.0552	0.0624		
	h	769.5	829.5	889.3	950.9	1015.1	1080.5	1144.9	1206.8	1268.1	1326.0	1379.8	1430.3	1526.4		
	s	0.8970	0.9455	0.9920	1.0382	1.0846	1.1302	1.1735	1.2139	1.2525	1.2880	1.3197	1.3491	1.4022		
15500	v	0.0228	0.0242	0.0258	0.0280	0.0302	0.0329	0.0360	0.0393	0.0429	0.0464	0.0499	0.0534	0.0603		
	h	768.9	828.2	887.2	947.8	1011.1	1075.7	1139.0	1200.3	1261.6	1319.6	1375.8	1423.6	1520.4		
	s	0.8946	0.9427	0.9886	1.0340	1.0797	1.1247	1.1674	1.2073	1.2457	1.2815	1.3131	1.3424	1.3959		

Sh = перегрев, град. по Фаренгейту  
 v = удельный объем, кубич. футов на фунт  
 h = Энтальпия, Ватт/фунт  
 s = Энтропия, Ватт/град. по Фаренгейту/фунт

Источник: Компания Combustion Engineering, Inc.

Что эквивалентно:

$$\frac{146 \times 10^6 \text{ Btu/час}}{3413 \text{ Btu/кВтч}} = 42778 \text{ кВт}$$

Таблица 46.5 КПД типового парового котла

Топливо	Тип котлоагрегата	Назначение	Средний кпд при полной нагрузке, %
Уголь	Горизонтальный и вертикальный котел с обратными дымогарными трубами	Отопление	От 65 до 75
Уголь	Водотрубный котел низкого напора	Отопление	От 70 до 75
Мазут или газ	Водотрубный котел низкого напора	Отопление	75
Уголь	Водотрубный котел без рекуперации тепла	Производство электроэнергии	От 75 до 77
Мазут или газ	Только паровой котел	Производство электроэнергии	От 75 до 80
С механической подачей угля (низкого качества)	Паровой котел и котел-утилизатор	Производство электроэнергии	От 80 до 83
С механической подачей угля (высокого качества)	Паровой котел и котел-утилизатор	Производство электроэнергии	от 83 до 86
Пылевидное топливо - уголь (низкого качества)	Паровой котел и котел-утилизатор	Производство электроэнергии	от 82 до 85
Пылевидное топливо - уголь (высокого качества)	Паровой котел и котел-утилизатор	Производство электроэнергии	От 85 до 90
Природный газ и мазут (высокого качества)	Паровой котел и котел-утилизатор	Производство электроэнергии	От 82 до 85

Для определения того, сколько топлива понадобится для производства пара в таком объеме, с учетом того, что КПД котла равен 80%, необходимо значение мощности котла в Btu/час разделить на значение кпд (десятичное число). Таким образом мы определим величину тепловой энергии в Btu/час, полученной при сгорании топлива:

$$\frac{146 \times 10^6}{0,80} = 182,5 \times 10^6 \text{ Btu/час} \quad (46 \times 10^6 \text{ ккал/час})$$

что соответствует примерно 7,6 тоннам угля в час (6,9 тонн/час) или 1200 галлонам мазута № 6 в час (4,5 кубич. м в час). Затраты составят приблизительно 365 долларов США в час или стоимость пара может быть оценена как 2 доллара США на миллион Btu (8 долларов США/млн.ккал). Вышеуказанный котел потребляет топлива на 32 миллиона долларов США в год. Производство пара в меньших объемах, например, всего 100000 фунтов/час широко применяется на относительно небольших промышленных предприятиях. Для сравнения, производительность паровой установки на большом объединенном целлюлозно-бумажном заводе в 15 - 20 раз выше.

В зависимости от технологии варки целлюлозы, очень немногие целлюлозно-бумажные заводы производят все необходимое количество пара на основе сжигания ископаемого топлива. Заводы, на которых используется процесс сульфатной варки целлюлозы, применяют топливо, являющееся побочным про-

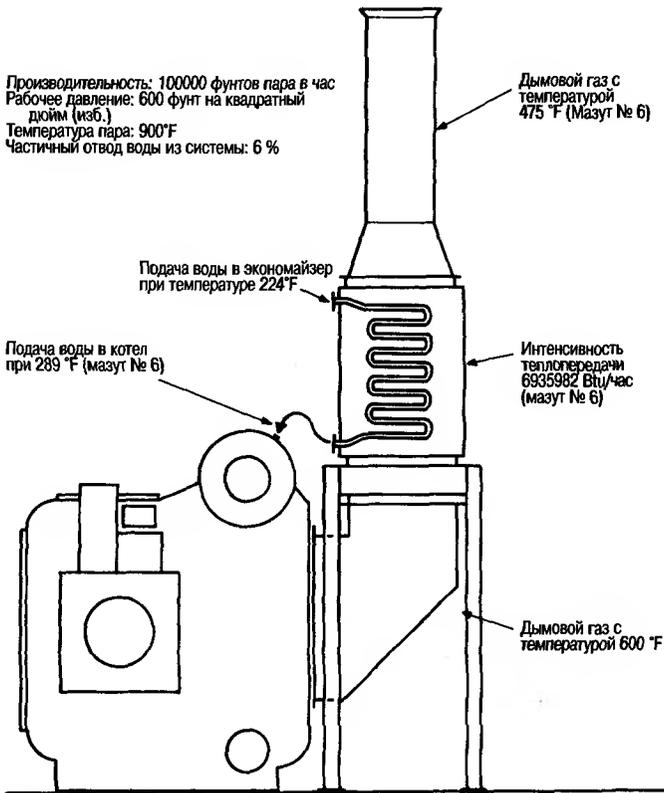


Рис. 46.1 Схема включения экономайзера в объем комплектной поставки парового котла. Экономия на топливе - порядка 200000 долларов в год.

дуктом производства, например, кору или щелок наттронной варки. Однако, даже такого рода топливо требует затрат на подготовку и обработку, так что считается вполне приемлемым оценивать суммарную стоимость топлива в размере 25 миллионов долларов США в год.

Значительной экономии можно добиться за счет, с первого взгляда, незначительного повышения кпд на любом этапе производственного цикла. В рассмотренном выше примере парового котла небольшой мощности повышение кпд котла всего на 1% приводит к экономии 32000 долларов США в год; для бумажной фабрики такое 1%-ное повышение кпд котла может означать экономию порядка 250000 долларов США в год.

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛА**

В тепловом цикле можно сразу выделить конкретные точки, в которых наиболее вероятны потери энергии. Для обеспечения полного сгорания топлива в печи требуется некоторый минимальный объем избыточного воздуха, обеспечивающий тщательное перемешивание молекул топлива с соответствующими молекулами кислорода. Так как воздух представляет собой смесь, на 80% состоя-

щую из азота и всего лишь 20% из кислорода, нетрудно понять, что азот является основным пассивным элементом в системе, который не вносит никакого вклада, а лишь поглощает энергию в процессе нагрева в печи, а затем сбрасывается в атмосферу при температуре примерно на 400°F (204°C) выше температуры окружающей среды.

Объем необходимого избыточного воздуха изменяется в зависимости от вида топлива, конструкции горелки или механического загрузчика топлива. Например, при сжигании угля может потребоваться от 20 до 50% избыточного воздуха, в зависимости от типа печи, в то время как при сжигании природного газа или мазута, избыточный воздух требуется лишь в объеме от 5 до 20%. Хотя избыточный воздух необходим для процесса смешения, он поглощает тепловую энергию топлива, унося ее вместе с дымовыми газами и увеличивая объем дымовых газов, которые пропусаются через котел при помощи вытяжного вентилятора.

Плохая работа оборудования является основной причиной снижения кпд. Если для обеспечения оптимального сжигания в котле, работающем на жидком топливе, требуется 20% избыточного воздуха, однако, объем фактического потребления, из-за несоответствующего регулирования, составляет 40% (обычная ситуация), суммарный объем дымовых газов увеличится на 16%. Если паровой котел производительностью 100000 фунтов/час (45400 кг/час) (см. пример выше) рассчитан на кпд 80% и 20% избыточного воздуха, то снижение кпд может составить приблизительно 15% из-за потерь тепловой энергии с отводимыми дымовыми газами. Снижение кпд на 15% в пересчете на топливо составил бы:  $0,15 \times 182,5 \times 10^6 = 27,4 \times 10^6$  Btu в час ( $6,9 \times 10^6$  ккал/час). Увеличение объема газа на 16% при содержании избыточного воздуха в объеме 40% вместе 20%, будет способствовать дальнейшим потерям тепловой энергии по сравнению с ожидаемыми расчетными показателями:

$$0,16 \times 27,4 = 4,38 = 4,38 \times 10^6 \text{ Btu/час} (1,1 \times 10^6 \text{ ккал/час}).$$

Такие теплопотери эквивалентны более, чем 2% суммарного объема всего сожженного топлива или составляют примерно 64000 долларов США в год, истраченных напрасно. Согласно эмпирическому правилу, каждые 10% избыточного воздуха приводят к снижению кпд парового котла на 1%.

В системе управления процессом сжигания обычного парового котла, отклонение давления в паровом коллекторе регулирует подачу топлива и воздуха в печь. Соотношение топливо/воздух изменяется в зависимости от нагрузки по пару. На этапе пуско-наладочных работ, данное соотношение и соответствующие механические связи задаются компанией-изготовителем системы управления. Однако со временем паровой котел устаревает и первоначальные установки изменяются из-за износа механических соединений и увеличения потерь давления по всему котлу. На практике оператор задает соотношение воздух/топливо вручную, минуя автоматику, поддерживая процесс сжигания в таком состоянии, к которому он привык; другими словами, процесс управления котлами является субъективным и его параметры в значительной степени различаются в зависимости от представлений того или иного оператора.

Для исключения случаев снижения кпд, обусловленного субъективным фактором управления конкретным оператором, может потребоваться дополнительное техобслуживание котла или установка дополнительных контрольно-измерительных приборов. Например, большинство котельных топок работают при давлении ниже атмосферного, следовательно, избыточный воздух может попасть в корпус котла через отверстия, появляющиеся в его корпусе и способствовать снижению качества топливовоздушной смеси и снижению кпд. С этой целью необходимо проводить регулярные осмотры и техобслуживание корпуса котла. Для мониторинга и наиболее оптимального соотношения топлива/воздуха необходимы аналитические приборы. Наиболее часто применяются плот-

номеры дыма и измерительные приборы для определения содержания  $O_2$  и  $CO_2$ , поскольку в дымовой трубе имеется непосредственная взаимосвязь между содержанием данных газов и избыточным воздухом.

Так как температура дымового газа в значительной степени влияет на КПД, то решение о вложении капитала в оборудование для рекуперации тепла (экономайзеры и калориферы) обычно принимается уже на стадии проектирования парового котла. При постоянном росте цен на топливо, применение такого оборудования для рекуперации тепла, обеспечивающего увеличение КПД на 1% при снижении температуры дымового газа на каждые  $40^\circ F$  ( $22^\circ C$ ), стало нормой для всех котлов, за исключением котлов очень небольшой мощности.

Кроме рекуперации тепла механическими способами, следует упомянуть о таких дополнительных устройствах, позволяющих снизить температуру газов в дымовой трубе, как, например, сажеобдувочные аппараты, химвагенты, позволяющие интенсифицировать процесс горения, а так же о необходимости более пристального внимания со стороны оператора.

### **ТЕМПЕРАТУРА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ**

---

На типовых промышленных паровых установках, имеющих излишки отработанного пара, повышение температуры питательной воды на каждые  $10^\circ F$  ( $6^\circ C$ ) на стороне воды в паровом котле обычно приводит к снижению расхода топлива на 1%. Экономия топлива составит всего лишь 1/3 указанного процента, если отбор пара из турбины происходит на различных ее ступенях в целях подогрева воды, и если не имеется какого-либо избытка мятого пара.

Термический деаэрактор является одним из примеров оборудования, используемого для нагрева питательной воды. Большая часть таких деаэракторов работает при температуре воды около  $220^\circ F$  ( $104^\circ C$ ), однако имеются и исключения. Из таблиц водяного пара видно, что  $220^\circ F$  соответствует 17,2 фунтам/кв. дюйм (абс.) (2,5 фунта/кв. дюйм (изб.)) (для получения значений давления в барах, умножьте значение в фунтах/кв.дюйм на 0,069). Если деаэрактор рассчитан на работу при давлении 10 фунтов/кв. дюйм (изб.) (25 фунтов/кв. дюйм (абс.)), что соответствует  $240^\circ F$  ( $116^\circ C$ ), и если давление подаваемого в деаэрактор пара до редукционного клапана составляет порядка 20 фунтов/кв. дюйм (изб.) (35 фунтов/кв. дюйм (абс.)), то необходимо выполнить соответствующую настройку для поддержания значения температуры  $240^\circ F$ , во избежание потерь энергии на участке регулирующего клапана. Такой прием позволит повысить КПД на 2% (при каждом повышении температуры на  $20^\circ F$  ( $11^\circ C$ ), что оценивается в 64000 долларов США в год в случае использования парового котла малой мощности (Рис. 46.1).

### **ДАВЛЕНИЕ ПАРА**

---

Задача инженера-энергетика состоит в использовании пара с наиболее высоким энергетическим потенциалом. Несмотря на то, что подаваемый в термический деаэрактор пар давлением 20 фунтов/кв. дюйм (изб.) конденсируется при избыточном давлении 10 или при 2,5 фунтов/кв. дюйм, он, тем не менее, содержит приблизительно то же самое количество тепловой энергии (в Btu/ фунт). Однако конденсация при давлении 10 фунтов/кв. дюйм (изб.) происходит при температуре  $240^\circ F$ , тогда как конденсация при давлении 2,5 фунта/кв. дюйм (изб.) - всего лишь при температуре  $220^\circ F$ . В приведенном здесь примере вода при температуре  $240^\circ F$  заключает в себе на 20 Btu/фунт больше энергии, чем вода при температуре  $220^\circ F$ , и, следовательно, для достижения указанной температуры требуется немного больше пара. Для достижения уровня 20 Btu/фунт при более высокой температуре воды потребуются дополнительно только 0,02 фунта (9 г)

пара с энтальпией примерно 1150 Вту/фунт (640 кал/г). Такое практически незаметное увеличение пара позволит сэкономить приблизительно 2% потребляемого топлива.

### **УМЕНЬШЕНИЕ ВОДЫ, ЧАСТИЧНО ОТВОДИМОЙ ИЗ СИСТЕМЫ (ПРОДУВКА)**

По таблицам водяного пара можно определить, что энтальпия воды в паровом котле, работающем под давлением 600 фунтов/кв. дюйм (изб.) (615 фунтов/кв. дюйм (абс.)), приблизительно равна 475 Вту/фунт (264 кал/г).

Предположим, что питательная вода нагревается с 220°F (104°C) [энтальпия 188 Вту/фунт (105 кал/г)], до значения энтальпии воды в котле, 475 Вту/фунт (264 кал/г), дополнительные 287 Вту/фунт (160 кал/г). Для котла, взятого нами в качестве примера, с производительностью 100000 фунтов пара в час (45400 кг/час), частичный отвод воды из системы в размере 1 %, производимый для практических целей, составляет примерно 1000 фунтов пара в час (454 кг/час). Тепловая энергия, необходимая для нагрева этого количества (1000 фунтов/часы воды, частично отводимой из системы), составит:

$$1000 \text{ фунтов/час} \times 287 \text{ Вту/фунт} = 287000 \text{ Вту/час,}$$

что приблизительно равно 0,16% общего количества потребляемой энергии, общей стоимостью около 5000 долл. США/год. Таким образом, в данном примере, уменьшение воды, частично отводимой из системы на 1% (например, с 10 до 9%), приводит к экономии приблизительно 0,2% топлива. Дополнительная экономия может быть получена за счет сокращения объема химической обработки, поскольку обработке подлежит вода, отводимая из системы. Сокращение объема химической очистки может быть скомпенсировано за счет предварительной обработки питательной воды, посредством эксплуатации котла при более высокой концентрации растворенных веществ за счет возврата большего количества конденсата. Оптимальный уровень содержания растворенных веществ в котле может быть достигнут за счет проверки пара на его чистоту.

### **УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ, ВЫДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ПРИ ЧАСТИЧНОМ СБРОСЕ ВОДЫ ИЗ СИСТЕМЫ**

Продувка требуется для паровых котлов любого типа. Количество продувки определяется в зависимости от чистоты питательной воды, давления пара, допустимой концентрации растворенных в воде твердых веществ и конструкции котла. Извлечение тепловой энергии в процессе частичного отвода воды из системы температуре около 120°F (49°C) является обычной практикой, если, конечно, утилизация излишка мягкого (отработавшего) пара, имеющегося на предприятии, не связана с определенными трудностями. В этом случае увеличение температуры направляемой в деаэрактор воды приводит к уменьшению объема мягкого пара, который мог бы сконденсироваться в деаэраторе.

Вода, частично отводимая из котла, работающего под давлением 600 фунтов/кв. дюйм (изб.) (41,4 бар) имеет энтальпию 475 Вту/фунт (264 кал/г); вода при 120°F (49°C) имеет энтальпию 88 Вту/фунт (49 кал/г); так что при частичном отводе воды из системы вполне возможна рекуперация примерно 387 Вту/фунт (215 кал/г) тепловой энергии.

Предположим что при частичном отводе 10000 фунтов воды в час (4540 кг/час), что составляет примерно 9% в рассматриваемом примере парового котла, рекуперация тепловой энергии в объеме 387 Вту/фунт (215 калорий/г) позволит сэкономить 3,87 × 106 Вту/час (1 × 106 ккал/час), или 186 долл. США в день при стоимости 2 доллара США /млн. Вту.

Направление тепловой энергии воды, частично отводимой из системы, непосредственно через теплообменник в систему подпиточной воды с температурой 60°F (16°C) является примером нерационального использования энергии высокого уровня из-за разности температур продувки и подпиточной воды, которая составляет примерно 430°F (221°C). Намного более эффективно мгновенное испарение продувки при каком-либо промежуточном давлении с образованием пара соответствующего энергетического уровня, который, в свою очередь, мог бы выполнить работу при более высокой температуре.

Оставшаяся после мгновенного испарения вода могла бы затем использоваться для теплообмена с подпиточной водой с более низкой температурой. Типовая система, включающая емкость для мгновенного испарения воды, частично отводимой из котла, за которой следует теплообменник, показана на рис. 46.2

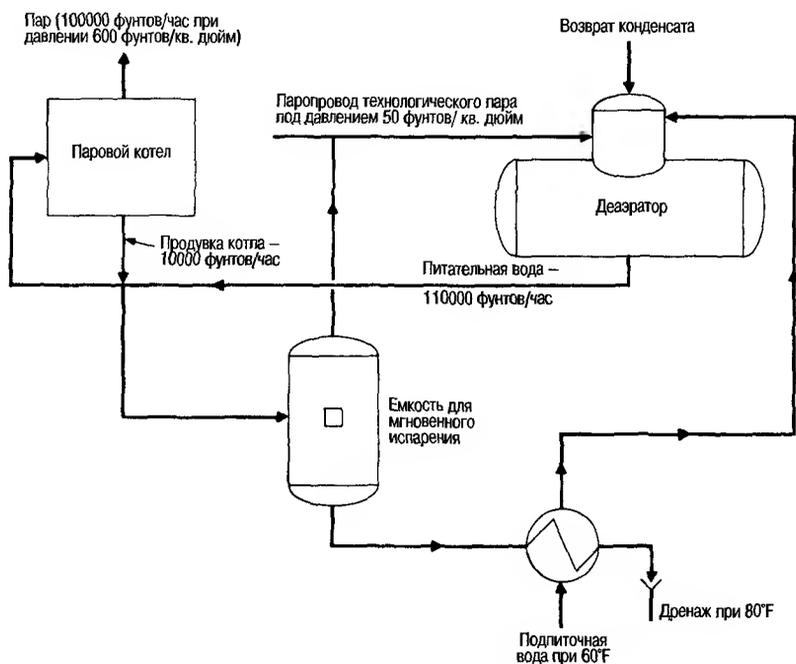


Рис. 46.2 Система рекуперации тепла воды, частично отводимой из котла.

Если завод использует систему пара низкого давления (50 фунтов/кв. дюйм) для целей нагрева в ходе технологических процессов, то при таком давлении вода, частично отводимая из системы, обычно подвергается мгновенному испарению. Простое алгебраическое уравнение демонстрирует степень перехода воды, частично отводимой из системы, в паровую фазу при давлении 50 фунтов/кв. дюйм (изб.) на основе энтальпии воды с давлением 600 фунтов/кв. дюйм (изб.) (41,4 бара), пара с давлением 50 фунтов/кв. дюйм (изб.) (3,5 бара) и воды с давлением 50 фунтов/кв. дюйм (изб.), а именно:

$$W_F = \frac{W_B (h_p - h_R)}{L_R}$$

где:  $W_F$  = количество мгновенно испаряющегося пара, фунты/час  
 $W_B$  = продувка, фунты/час  
 $h_p$  = энтальпия котловой воды, Btu/фунт  
 $h_R$  = энтальпия жидкости при более низком давлении, Btu/фунт  
 $L_R$  = теплота парообразования, Btu/фунт, при давлении испарения

В рассматриваемом нами примере, формула примет следующий вид:

$$W_F = \frac{10000 (475 - 267)}{912} = 2281 \text{ фунтов/час}$$

Используя теплоту котловой воды, падение давления в емкости для мгновенного испарения, преобразует некоторое количество воды, частично отводимой из системы, в пар, с теплосодержанием/фунт более, чем в два раза превышающим теплосодержание котловой воды и с температурой примерно 298°F (148°C), что дает возможность применения полученного пара в целом ряде высокотемпературных технологических процессов. Оставшаяся часть воды, частично отводимой из системы, теплосодержание которой уменьшилось, все еще может быть использована в процессе теплообмена с подпиточной водой с температурой 60°F (16°C). Температура воды, частично отводимой из системы, направляемой в систему канализации, будет значительно ниже 120°F (49°C), а это как раз та самая температура, на основе которой был произведен расчет рекуперации 387 Btu/фунт потенциальной тепловой энергии. Предельная разница температур между холодной подпиточной водой и охлажденной водой, частично отводимой из системы, составляет 20°F (11°C), а это – стандартный расчетный коэффициент.

## **КПД ПАРОВЫХ КОТЛОВ**

Как правило максимальный КПД парового котла составляет примерно 80 - 85 % от его расчетных параметров. Поэтому, электростанция, в состав которой входят несколько паровых котлов, старается оптимизировать их работу посредством выбора соответствующих режимов нагрузки для каждого котлоагрегата. Однако КПД котла с полной рекуперацией тепла может настолько превышать КПД котла без рекуперации тепла, что, в общем и целом, может оказаться более эффективным эксплуатировать первый котел при более низком КПД, чем эксплуатировать второй котел при его оптимальных рабочих параметрах. Оптимизация режимов работы различных котлов требует опыта и проведения исследований.

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТУРБИН**

Электростанциям, на которых используются конденсационные турбины, следует уделить особое внимание вопросу чистоты конденсаторов. Здесь под хорошей теплопередачей понимают создание лучшего отрицательного давления (вакуума) и передачу большего количества тепловой энергии в турбину. Согласно эмпирическому правилу, уменьшение степени разрежения в конденсаторе всего лишь на 1 дюйм (25,4 мм) ртутного столба приводит к снижению КПД турбины на 1%.

В промышленных турбинах с регулируемым отбором, наиболее эффективный режим работы заключается в максимальном отборе пара и минимальной конденсации. Стоимость сжигаемого топлива, как ископаемого, так и состоящего из отходов, определяет количество пара, направляемого в конденсор турбины с регулируемым отбором. Промышленное предприятие, работающее, например, на мазуте в большинстве случаев предпочитает закупать электроэнергию, чем пытаться производить ее при использовании турбины, в которой пар должен быть направлен в конденсатор. Однако, электроэнергия, произведенная турбинами с регулируемым отбором пара или турбинами с противодавлением, обычно дешевле покупной. В этом и заключается суть тенденции перехода к совместному производству тепловой и электрической энергии (комбинированный цикл) или удовлетворения в максимальной степени потребностей технологических процессов в паре за счет направления выпуска из турбины непосредственно в технологический паропровод.

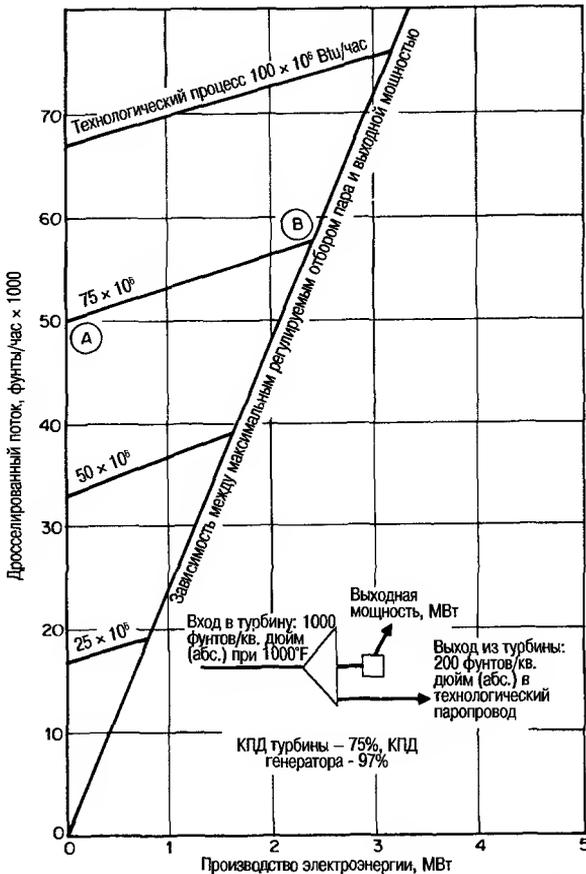
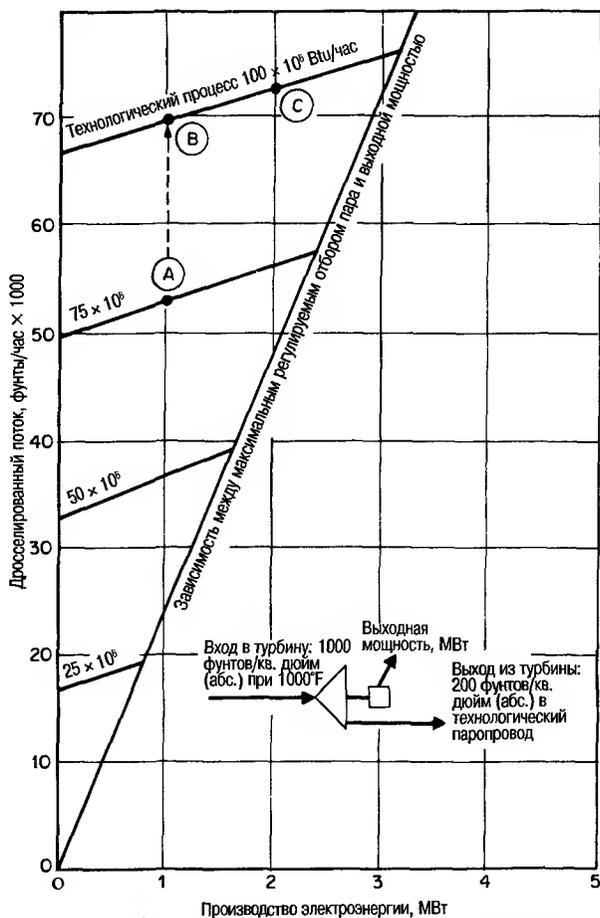


Рис. 46.3 Зависимость между дросселированием потока и выработкой электроэнергии при различных потребностях в паре для технологических потребителей пара в случае применения гипотетической турбины с противодавлением. Точка А соответствует отсутствию выработки электроэнергии, точка В соответствует максимальной выработке электроэнергии.

## ПОСОБИЕ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИКОВ

На рисунке 46.3 приведены ограничения, выявленные в ходе эксплуатации гипотетической турбины с противодавлением, вырабатывающей электроэнергию и выпускающей мятый пар в технологический паропровод. Потребности технологического процесса в паре находятся в прямой зависимости от того, сколько электроэнергии может быть выработано. Как правило, потребность технологического процесса в энергии указывается в Btu/час, которые, зная значение энтальпии пара, могут быть легко преобразованы в фунты/час производимого пара.

Если для технологических нужд требуется  $75 \times 10^6$  Btu/час ( $19 \times 10^6$  ккал/час), теоретически электростанция могла бы и не вырабатывать электроэнергию (Рисунок 46.3, точка А) или постепенно увеличивать объемы выработки примерно до 2,4 МВт (мегаватты; 1 МВт = 100 кВт) (Рисунок 46.3, точка В), и в то же самое время поставлять необходимые  $75 \times 10^6$  Btu/час в технологический процесс. Однако, при переходе от 0 до 2,4 МВт, скорость дросселирования потока в тур-



**Рис. 46.4** Влияние увеличения потребности в тепловой энергии для технологических нужд и выработки электроэнергии на скорость дросселирования потока, показанное на примере точек А, В и С.

бине повышается с 50000 до 57000 фунтов/час (с 22700 до 25900 кг/час). Даже при увеличении расхода пара количество тепловой энергии в Btu/час, направляемой на технологические нужды, останется неизменным, т.к. энтальпия мягого пара уменьшается пропорционально увеличению расхода пара.

Дроссельный клапан рассматриваемой гипотетической турбины модулируется при помощи вала регулятора, предназначенного для регулирования расхода пара в целях поддержания скорости вращения вала 3600 оборотов/мин или 60 оборотов/сек, что соответствует режиму работы по выработке тока генератором за 60 циклов. Изменение величины давления в паропроводе мягого пара с давлением 200 фунтов/кв. дюйм (абс) (14 бар) также является сигналом для проведения регулировки дросселя.

Как правило, промышленное предприятие определяет оптимальную нагрузку генератора электроэнергии посредством регулирования величины тока, подаваемого в электрическую сеть. Если электрическая система забирает от гене-

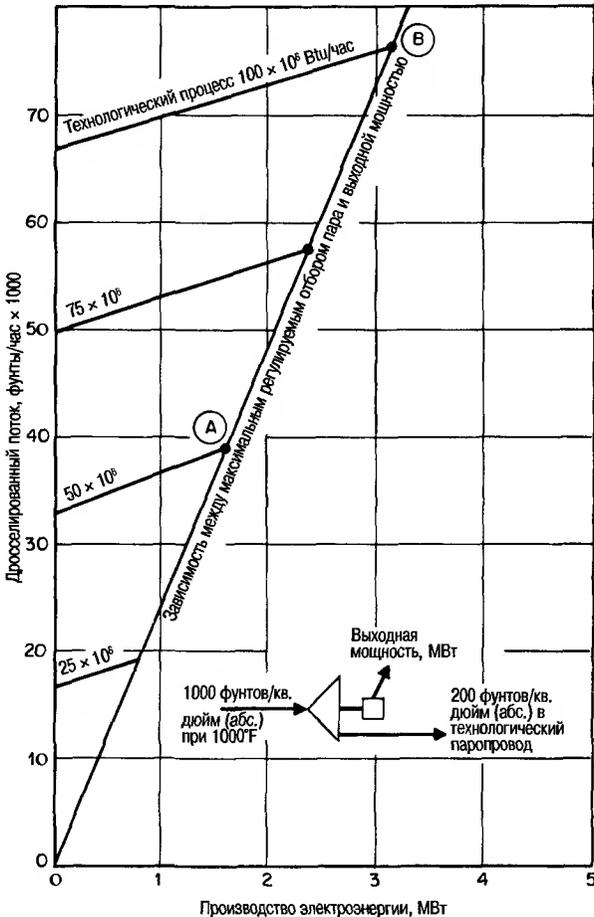


Рис. 46.5 Максимальная выходная мощность изменяется в зависимости от скорости дросселирования потока и количества требуемого технологического пара.

ратора 1 МВт при потребности в паре для технологических нужд в размере  $75 \times 10^6$  Btu/час ( $19 \times 10^6$  ккал/час), то подобный режим работы представлен на рисунке 46.4, точкой А. Условия эксплуатации являются следующими: (1) скорость дросселирования потока – 53000 фунтов/ час (24000 кг/час), (2) выходная мощность генератора 1 МВт, (3) потребность в технологическом паре -  $75 \times 10^6$  Btu/час ( $19 \times 10^6$  ккал/час).

Если технологический цех вводит в эксплуатацию еще одну установку обору-дования посредством открытия клапана на паре и, тем самым, увеличивая суммарную потребность в технологическом паре до  $100 \times 10^6$  Btu/час ( $25 \times 10^6$  ккал/час), эта потребность в дополнительном количестве пара приведет к падению давления в паропроводе с абсолютным давлением 1200 фунтов/кв. дюйм (14 бар). Падение давления будет немедленно зафиксировано датчиком давления, который подаст сигнал на дроссельный клапан турбины в целях его открытия и поддержания давления на уровне 200 фунтов/ кв. дюйм (абс.) (14 бар).

Рабочая точка в процессе этого изменения начнет перемещаться из точки А (Рисунок 46.4) в вертикальном направлении до линии 1 МВт (поддерживая величину электрической нагрузки на том же самом уровне) до тех пор, пока не достигнет точки В. Новая комбинация параметров является следующей: (1) скорость дросселирования потока – 69500 фунтов/час (31500 кг/час), (2) выходная мощность генератора остается равной 1 МВт, (3) потребность в технологическом паре -  $100 \times 10^6$  Btu/час ( $25 \times 10^6$  ккал/час).

Оператору электростанции может внезапно потребоваться увеличить выходную мощность генератора до 2 МВт, для удовлетворения собственных нужд электростанции без увеличения потребления тепловой энергии, которая остается равной  $100 \times 10^6$  Btu/час ( $25 \times 10^6$  ккал/час). Поскольку оператор электростанции увеличивает нагрузку генератора постепенно, это увеличение, в свою очередь, приводит к увеличению крутящего момента вала привода турбины, который замедлит вращение турбины. Регулятор турбины немедленно зафиксирует снижение числа оборотов в минуту и подаст сигнал открытия дроссельного клапана.

Рабочая точка теперь перемещается вверх из точки В на рис. 46.4, по линии  $100 \times 10^6$  Btu/час ( $25 \times 10^6$  ккал/час) до пересечения с вертикальной линией 2 МВт в точке С. После достижения равновесия, новая комбинация параметров будет следующей: (1) скорость дросселирования потока - 72600 фунтов/час (33000 кг/час), (2) выходная мощность генератора теперь составляет 2 МВт, (3) нагрузка на технологический паропровод остается  $100 \times 10^6$  Btu/час ( $25 \times 10^6$  ккал/час).

Такая ситуация может возникнуть, если оператору электростанции потребуется установить максимальную выходную мощность генератора. На рисунке 46.5 показано, что, как и предполагалось, величина максимальной вырабатываемой мощности изменится в зависимости от скорости дросселирования потока. Однако эта величина также зависит и от количества используемого технологического пара. Если потребность в технологическом паре составляет  $50 \times 10^6$  Btu/час ( $12,6 \times 10^6$  ккал/час), то максимальная выходная мощность генератора будет в точке А или 1,6 МВт; с другой стороны, если потребность в технологическом паре составляет  $100000$  Btu/час ( $25 \times 10^6$  ккал/час), то максимальная мощность, вырабатываемая генератором, будет соответствовать параметрам точки В, или 3,1 МВт.

Ниже перечислены некоторые основные проблемы, с которыми обычно сталкиваются при использовании диаграмм такого типа:

1. Котельная вода содержит вещества, образующие в турбине слой накипи. Образование накипи способствует снижению КПД турбины, и линия максимальной выходной мощности начинает перемещаться пока не достигнет положения, аналогичного положению пунктирной линии на рис. 46.6, в результате чего промышленное предприятие уже не имеет возможности выра-

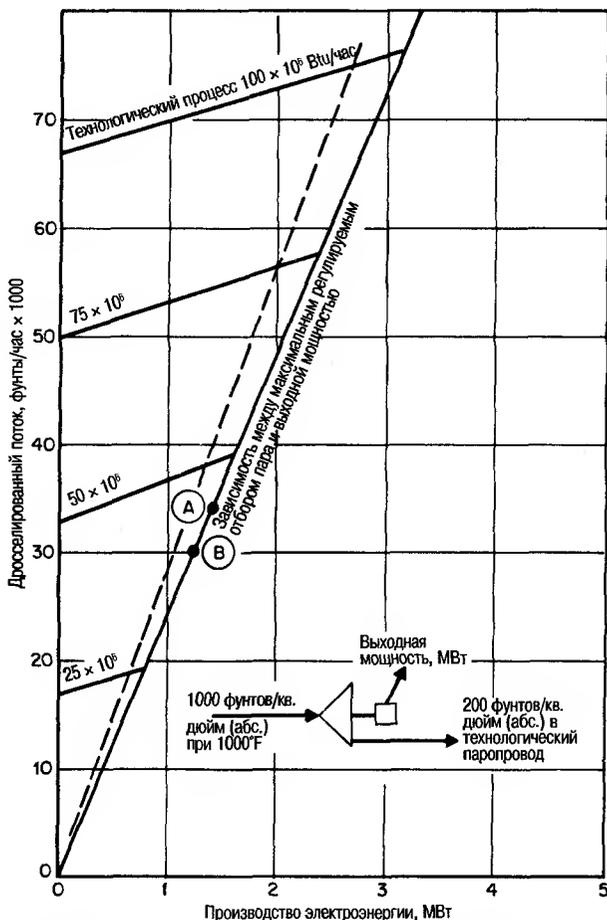


Рис. 46.6 Максимальная предполагаемая выходная мощность при 34000 фунтах пара в час (точка А) составляет 1,4 МВт; при 30000 фунтов пара в час - 1,2 МВт.

батывать сколько же электроэнергии, как раньше.

2. Если расходомер, установленный на паре, допускал ошибку при считывании показателей, и указывал 34000 фунтов/час (15400 кг/час) вместо 30000 фунтов/час (13600 кг/час), то максимальная выходная мощность на диаграмме соответствовала бы 1,4 МВт (точка А, рис. 46.6), когда как фактическая максимальная вырабатываемая мощность была бы на уровне 1,2 МВт (точка В, рис. 46.6).
3. Давление на входе в дроссельный клапан и значения температуры могут быть ошибочными. Если показания приборов превышают фактические параметры, величина энтальпии пара будет ниже и, следовательно, производительность турбины также будет ниже. Если по каким-либо причинам регулятор давления на уровне 200 фунтов/кв. дюйм (абс.) (14 бар) поддерживал несколько более высокое противодавление в паропроводе для техноло-

гических нужд, это также привело бы к снижению выходной мощности генератора.

4. Другой причиной может быть износ уплотнений межступенчатого пространства турбины или уплотнения вала, что также приведет к снижению кпд турбины.

### **КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ГОРШКИ**

---

Конденсационные горшки являются наиболее важной механической составляющей для поддержания максимального кпд паровых систем. Большое промышленное предприятие имеет в своем составе сотни конденсационных горшков.

Конденсационные горшки используются для удаления из паровых систем конденсата с низким теплосодержанием для его утилизации, предотвращая потери пара с высоким теплосодержанием. При отсутствии конденсационных горшков, конденсат остается в системе, резко снижая эффективность теплообмена. Для осуществления сброса пара с высоким теплосодержанием в атмосферу, горшки могут быть открытого типа.

В регионах с холодным климатом требуется спутниковый обогрев технологических трубопроводов и трубопроводов с топливом. В таких регионах необходимо соблюдать определенный температурный режим в целях поддержания этих жидких сред в жидкой фазе для возможности их транспортировки по трубопроводам. Такой спутниковый обогрев предполагает крепление медной трубы диаметром 1/4 или 3/8 дюйма на трубопровод под слоем теплоизоляции. Затем в эту трубу подают пар для поддержания положительных температур в магистральном трубопроводе. Обычно пар из трубы, используемой для спутникового обогрева, на выходе из спутника сбрасывают в атмосферу, что является причиной существенных потерь пара. Для исключения подобных потерь, в местах сброса пара необходимо предусмотреть конденсационные горшки.



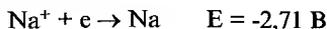
# ПРИЛОЖЕНИЕ

---

## **УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОХИМИИ**

---

При описании электрохимических процессов все реакции в полуэлементе (т.е. реакции, протекающие на каждом электроде) представлены в виде восстановительных реакций, например:



Добавление электронов в систему следует показывать на левой стороне уравнения реакции. Эти реакции называют катодными: восстановление всегда происходит на катоде, а окисление – на аноде.

В электролитической ячейке анод может быть показан с отрицательным зарядом, а катод - с положительным зарядом. Если электроды (полуэлементы) образуют гальваническую пару, имеет место поток электронов через электропроводный материал от анода к катоду.

При электролизе внешний источник потока электронов (батарея, выпрямитель или генератор постоянного тока) соединен с электродами. Электрод, принимающий электроны, является катодом, так как на нем происходит восстановление катионов. Катод может быть показан со знаком "плюс", но это не следует делать, так как может возникнуть путаница. Если источником постоянного тока служит батарея, то отрицательный полюс батареи соединен с катодом и часто создается ошибочное впечатление, что катод химического источника тока заряжен отрицательно. Но в действительности, батарея представляет собой химический источник тока и ее отрицательным полюсом является анод этого источника тока; при электролизе от него идет поток электронов к катоду данного источника тока.

Путаницы можно избежать при правильной записи изучаемых реакций в полуэлементе; при этом, по определению, катодом называют поверхность, на которой протекает реакция восстановления, а анодом - поверхность, на которой протекает реакция окисления.

«NALCO»: КНИГА О ВОДЕ

Таблица А.1 Преобразование британских единиц измерения в метрические единицы

Британские единицы	Множитель	=	Метрические единицы
Акры (43 560 кв. футов) (640 акров/кв. м)	0,405		Гектары (га)
Акр-фут (acre-ft) (325 851 галл./акр-фут)	1234		Кубич. метры (м <sup>3</sup> )
Баррель (bbl) жидк. (42 галл./баррель)	0,16		Куб. метр (м <sup>3</sup> )
Британские тепловые единицы (Btu)	0,252		Килокалории (ккал)
Брит. тепл. ед./фунт (Btu / lb)	0,556		ккал/кг (кал/г)
Брит. тепл. ед./час/кв. фут (Btu/h/ft <sup>2</sup> )	2,69		ккал/час/м <sup>2</sup>
Кубический фут (ft <sup>3</sup> ) (1 куб. фут H <sub>2</sub> O = 62,4 фунта)	28,32		Литры (л) (1л = 1000 мл = 1000 см <sup>3</sup> )
(1 куб. фут = 7,48 галлонов)	0,0283		м <sup>3</sup>
Кубический фут в секунду (ft <sup>3</sup> /s)	1,7		м <sup>3</sup> /мин
(1 куб. фут/с = 449 галл./мин)	2,45 × 10 <sup>3</sup>		м <sup>3</sup> /сутки
Градусы Фаренгейта (F°)	0,556		Град. Цельсия (C°)*
(абсолютный ноль = -460°F или 0° Ренкина)			(абсолютный ноль = -273°C или 0 кельвин)
Фут (ft)	30,48		Сантиметры (см)
(1 фут H <sub>2</sub> O = 0,434 фунта/кв. дюйм)	0,305		Метры (м)
Фут в секунду (ft/s)	0,305		м/с
Галлоны (gal)	3,785		Литры (л)
(1 галлон H <sub>2</sub> O = 8,345 фунтов)	0,00379		м <sup>3</sup>
(7,48 галл./куб. фут)	3,785 × 10 <sup>-3</sup>		м <sup>3</sup>
Галлоны в минуту (gal/min)	5,45		м <sup>3</sup> /сутки
(695 галл./мин = 1 млн. галлонов в сутки (mgd))			
Галлоны/минуты/кв. футы (gal/min/ ft <sup>2</sup> )	40,6		л/мин/м <sup>2</sup>
(1галл./мин/кв. фут = 1,6 дюймов/мин)	4,06		см/мин
	0,0406		м <sup>3</sup> /мин/м <sup>2</sup>
	0,0406		м/мин
Граны на галлон (gr/gal)	17,1		Миллиграммы на литр
(1 гран/галл. = 17,1 нг/л (мг/л))			
Лошадиная сила (hp)	0,746		Киловатты (кВт)
Дюймы (in)	2,54		Сантиметры (см)
Миля (0,01 дюйма)	25,4		Микроны (10 <sup>-6</sup> м)
Миля	1,61		Километры (км)
Миллион галлонов в сутки (mgd)	3785		м <sup>3</sup> /сутки
(695 галл./мин = 1 млн. галлонов в сутки (mgd))	2,62		м <sup>3</sup> / мин
Унции (торговые) (oz)	28,4		г
Унции (жидкостные) (fluid)	29,6		Миллилитры (мл)
Фунты (lb)	0,454		Килограммы (кг)
	453,6		Граммы (г)

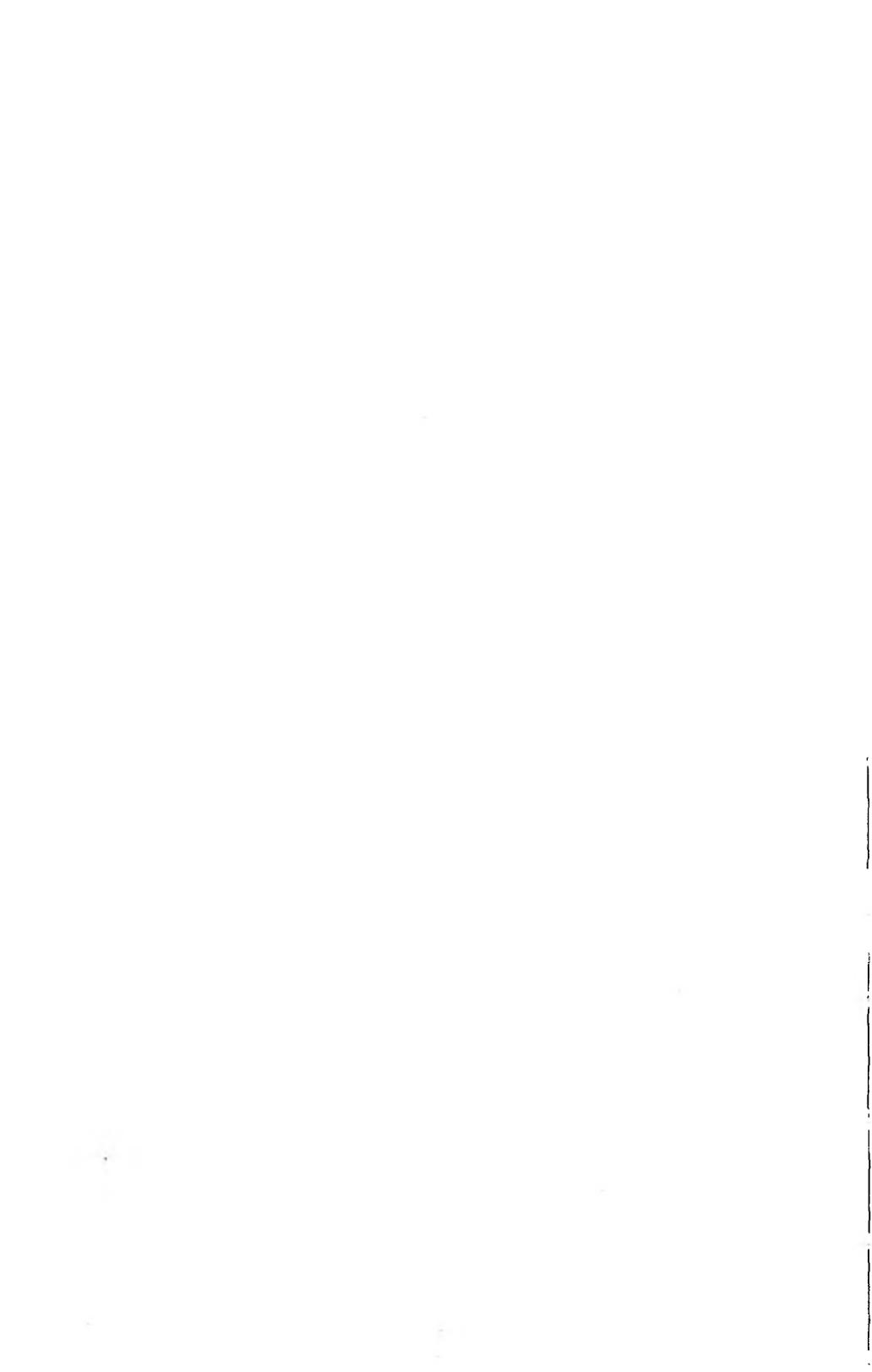
## ПРИЛОЖЕНИЕ

Британские единицы	Множитель	=	Метрические единицы
Фунт на кубический фут (lb/ft <sup>3</sup> )	0,016		г / см <sup>3</sup>
Фунты на квадратный дюйм (lb/in <sup>2</sup> )	16,02		кг / м <sup>2</sup>
(1 lb/in <sup>2</sup> = 2,31 ft H <sub>2</sub> O)	0,068		Атмосферы (атм) или бары
	703		кг / м <sup>2</sup>
	0,0703		кг / см <sup>2</sup>
	51,7		мм Hg
Квадратный фут (ft <sup>2</sup> )	0,093		м <sup>2</sup>
Квадратные дюймы (in <sup>2</sup> )	6,452		см <sup>2</sup>
Квадратные мили (mi <sup>2</sup> )	260		га
Длинные тонны (t, long)	1016		кг
Короткие тонны (t, short)	0,907		Тонны (т)
Тонны охлаждения (12000 Btu/h)	3024		ккал / час
Ярды	0,9144		м

\* При переводе единиц измерения температуры:  $(^{\circ}\text{F} - 32) \times 0,555 = ^{\circ}\text{C}$

**Таблица А.2** Приставки метрических единиц измерения

мега (М)	$10^6$	милли (м)	$10^{-3}$
кило (к)	$10^3$	микро (мк)	$10^{-6}$
деци (д)	$10^{-1}$	нано (н)	$10^{-9}$
санти (с)	$10^{-2}$	пико (п)	$10^{-12}$



# СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Абсорбция (Absorption):** Процесс поглощения газа поглотителем, в котором газ растворен в той или иной степени.

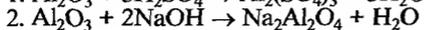
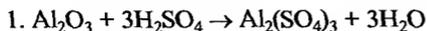
**Агломерат (Sinter):** Похожий на клинкер материал, получаемый в специальной печи из смеси угля и регенерированных железосодержащих материалов, например, твердых веществ из ямы-отстойника для окалины, и используемый в качестве завалки для доменной печи.

**Агломерировать (Agglomerate):** Соединять мелкие частицы в большую массу.

**Адсорбция (Adsorption):** Физическая адгезия молекул или коллоидов к поверхностям твердых частиц без химической реакции.

**Активный ил (Activated sludge):** Твердая биомасса, получаемая при аэробном процессе биологического превращения органического вещества и удаляемая самотеком или фильтрованием.

**Амфотерный (Amphoteric):** Амфотерным называют вещество, способное реагировать в воде или как слабая кислота, или как слабое основание. Например, соли алюминия гидролизуются в воде с образованием соединения, которое можно считать либо слабым основанием,  $Al(OH)_3$ , либо слабой кислотой,  $H_3AlO_3$ . Некоторые оксиды обладают способностью вступать в реакцию как с кислотами, так и с основаниями. Примером может служить  $Al_2O_3$ :



**Анаэробный организм (Anaerobic organism):** Организм, способный хорошо развиваться при отсутствии кислорода.

**Анион (Anion):** Отрицательно заряженный ион, образующийся при диссоциации солей, кислот или щелочей в водном растворе.

**Анионный (Anionic):** Состояние полимера, коллоида или крупной частицы, с одной стороны которых имеются способные к обмену катионы, а с другой - противоположный отрицательный заряд.

**Анод (Anod):** При электролизе или электрохимической коррозии анодом является участок, где металл переходит в раствор в виде катионов, оставляя эквивалент электронов для переноса к противозлектроду, именуемому катодом.

**Анодное окисление (Anodizing):** Обработка поверхности металла, при которой металл становится анодным (приобретает отрицательный потенциал).

**Аэробный организм (Aerobic organism):** Организм, которому для дыхания требуется кислород.

**Аэрозоль (Aerosol):** Коллоидная система, содержащая диспергированные в воздухе частицы жидкости или твердые частицы.

**Бактерия (Bacteria):** Микроскопические одноклеточные живые организмы, которые размножаются делением клетки или спорами, имеющими различную форму: кокк - сферическую, бацилла - форму палочки, а спирилла - изогнутую.

**Белая вода (White water):** Фильтрат из бумаго- и картоноделательной машины, как правило, используемый повторно для регулирования плотности.

**Биота (Biota):** Все живые организмы в какой-либо области или системе.

**Биоцид (Biocide):** Химическое вещество, используемое для борьбы с популяциями вредных микробов.

**БПК (BOD):** Биохимическое потребление кислорода воды, то есть количество кислорода, необходимое бактериям для окисления растворимых органических веществ в контролируемых условиях проведения испытаний.

**Бугристая коррозия (Tuberculation):** Коррозионный процесс, в ходе которого на поверхности металла появляются твердые бугорки, образованные продуктами коррозии; они повышают трение и ограничивают поток воды в системе распределения.

**Бумажный брак (Broke):** Обрезки или лишние листы в бумажном производстве, возвращаемые в бракомол на утилизацию.

**Буфер (Buffer):** Вещество в растворе, являющееся акцептором ионов водорода или ионов гидроксидов, добавленных в раствор в виде кислот или щелочей, благодаря чему значение pH почти не изменяется.

**Вагранка (Cupola):** Печь для расплавления передельного чугуна и металлолома с добавлением кокса.

**Внутренний слой (наполнитель) (Filler):** Глина, карбонат кальция или другие минеральные вещества, добавляемые к целлюлозному волокну при производстве некоторых сортов бумаги или картона.

**Водоносный горизонт (Aquifer):** Пористая подпочвенная геологическая структура, которая удерживает воду или является источником воды, например, скважина.

**Водоросли (Algae):** Простые растения, содержащие хлорофилл. Многие из них - микроскопические, но в благоприятных для роста условиях они растут колониями и образуют покров или сплошную неприятную на вид массу.

**Восстановление (Reduction):** Химическая реакция, в ходе которой элемент или соединение получает электроны, при этом его положительная валентность снижается.

**Вспухание (Bulking) (Увеличение объема):** Образование легкой рыхлой биомассы, обычно обусловленное присутствием нитчатых микроорганизмов.

**Вторичное волокно (Secondary fibers):** В бумажной промышленности - волокно, полученное из макулатуры.

**Выход продукта (Yield):** Скорость получения кека (осадка) в устройстве для обезвоживания.

**Гальваническая пара (Galvanic couple):** Соединение двух разнородных металлов в электролите, в результате которого по цепи проходит ток.

**Гидрофильный (Hydrophilic):** Имеющий сродство к воде. Антонимом является термин "гидрофобный", то есть несмачиваемый водой.

**Граны на галлон (Grains per gallon):** Единица измерения концентрации. 1 гран/галлон = 17,1 мг/л.

**Грибковые организмы (Fungi):** Если речь идет о воде, то это - простые одноклеточные организмы, без хлорофилла, часто нитевидные. К этому классу относятся плесень и дрожжи.

**Деионизация (Deionization):** Способ удаления ионов из воды, но чаще всего - процесс ионного обмена с удалением катионов и анионов независимо друг от друга.

**Декантация (Decantation):** Способ отмучивания (отстаивания), когда всплывающая жидкость содержит регенерируемый выщелачивающий химикат.

**Деление (клетки) (Fission):** В биологии - процесс размножения путем деления клетки.

**Деминерализация (Demineralization):** Любая технология удаления минеральных веществ из воды; однако этот термин часто употребляется только применительно к процессам ионного обмена.

**Дзета-потенциал (Zeta potential):** Разность значений напряжения на поверхности диффузного слоя, окружающего коллоидную частицу, и массы жидкости, находящейся за его пределами.

**Диализ (Dialysis):** Технология разделения на основе различий в скорости диффузии растворенных веществ через проницаемую мембрану.

**Диатомеи (Diatoms):** Микроорганизмы, близкие к водорослям, с коричневой окраской и кремнийсодержащим скелетом.

**Диспергатор (Dispersant):** Химикат, при добавлении которого твердые частицы в воде остаются в состоянии суспензии.

**Доменная печь (Blast furnace):** Печь для получения железа из руды путем восстановления коксом.

**ЕРА:** Управление охраны окружающей среды (США).

**Жесткость (Hardness):** Концентрация в воде солей кальция и магния. Первоначально, термин "жесткость" характеризовал способность воды к растворению мыла; иногда он также характеризует содержание железа и марганца. Термин "постоянная жесткость" означает, что концентрация компонентов, придающих воде жесткость, превышает концентрацию компонентов, придающих воде щелочные свойства. Термин "устраняемая жесткость" употребляется, когда концен-

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

трация компонентов, которыми обусловлена жесткость, такая же или ниже, чем концентрация компонентов, которыми обусловлена щелочность. В этих случаях соответственно употребляют также термины "некарбонатная" или "карбонатная" жесткость.

**Жидкость, сбрасываемая из центрифуги (Centrate):** Жидкость, остающаяся после удаления твердых примесей в виде кека на центрифуге.

**Заводнение (Waterflooding):** Способ вытеснения нефти из подземных пластов водой с возвратом воды на поверхность для повторного использования.

**Загрязнитель (Pollutant):** Загрязняющее вещество в достаточно высокой концентрации, представляющее опасность для водной среды и здоровья людей.

**Загрязняющее вещество (Contaminant):** Любое постороннее вещество (примесь), содержащееся в другом веществе; например, любое вещество, присутствующее в воде, но не  $H_2O$ , является загрязняющим веществом.

**Закон Генри (Henry's law):** По этому закону на основе температуры и парциального давления рассчитывают растворимость газа в жидкости.

**Закон Стокса (Stokes' law):** Формула для расчета скорости падения частиц в жидкости на основе плотности, вязкости и размера частиц.

**Затравка (Seed):** Частица или частицы, обычно имеющие кристаллическую структуру, добавляемые в пересыщенный раствор, для того чтобы вызвать осаждение.

**Зеленый щелок (Green liquor):** Жидкость, образующаяся при растворении расплавленной массы из печи для утилизации крафт-бумаги.

**Избирательность (Selectivity):** Последовательность, в которой происходит обмен присутствующих в окружающей водной среде ионов в ионообменном материале.

**Известь (Lime):** Химикат, широко применяемый для обработки воды. Известняк,  $CaCO_3$ , подвергают обжигу, получая негашеную известь,  $CaO$ , которую смешивают с водой для получения гидратной или гашеной извести,  $Ca(OH)_2$ .

**Измерительный водослив (Weir):** Переливное устройство, применяемое для измерения или регулирования параметров потока воды.

**Изотерма Фрейдлиха (Freundlich isotherm):** Кривая, построенная на основе результатов испытаний по удалению коллоидных веществ из воды, отражающая процесс адсорбции.

**Ингибитор (Inhibitor):** Химикат, препятствующий протеканию химической реакции, например, осаждению или развитию коррозии.

**Индекс Ланжелье (Langelier index):** Этот индекс используется для выражения степени насыщения воды, если речь идет о растворимости карбоната кальция.

**Индекс насыщения (Saturation index):** Зависимость концентрации карбоната кальция от значения pH, щелочности и жесткости воды, на основе которой определяют тенденцию к накипеобразованию.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Индекс объема ила (Sludge volume index):** Показатель, имеющий противоположное значение по сравнению с показателем плотности ила.

**Индекс плотности ила (Silt density index):** Показатель присущей воде тенденции к загрязнению обратноосмотической мембраны, определяемый путем пропускания потока через мембранный фильтр при постоянном давлении в течение определенного времени.

**Индекс Стифа-Дэвиса (Stiff-Davis index):** Индекс, используемый для прогнозирования устойчивости солоноватых вод, например, воды, используемой для заводнения при добыче нефти.

**Индекс устойчивости (Stability index):** Эмпирическая модификация индекса насыщения; этот индекс используется для прогнозирования тенденций к образованию накипи или развитию коррозии в системах водоснабжения.

**Инифильтрация (Infiltration):** Просачивание грунтовых вод в фановую трубу.

**Ион (Ion):** Атом или радикал в растворе, несущий определенный электрический заряд, либо положительный (катион), либо отрицательный (анион).

**Ионная сила (Ionic strength):** Показатель крепости раствора на основе концентрации и валентности присутствующих в нем ионов.

**Ионный обмен (Ion exchange):** Процесс, в ходе которого некоторые ненужные ионы с определенным зарядом абсорбируются из раствора в поглощающем ионы абсорбенте, а на их место из абсорбента в раствор поступают нужные ионы с таким же зарядом.

**Испытание по Ринглеману (Ringlemann test):** Метод сравнения светопропускаемости дымового факела со светопропускаемостью условного комплекта стандартных дисков различного цвета.

**Кальцинированная сода (Soda ash):** Химикат, широко применяемый для обработки воды, другое название - карбонат натрия.

**Карбонатная жесткость (Carbonate hardness):** Жесткость воды, обусловленная присутствием в составе воды бикарбонатов и карбонатов кальция и магния. Если щелочность превышает общую жесткость, то вода характеризуется карбонатной жесткостью; если жесткость превышает щелочность, то карбонатная жесткость равна щелочности.

**Катализ (Catalysis):** Добавление какого-либо вещества (катализатора), которое непосредственно не участвует в химической реакции, но повышает ее скорость.

**Катион (Cation):** Положительно заряженный ион, образующийся при диссоциации молекул в растворе.

**Катионный (Cationic):** Состояние полимера, коллоида или крупной частицы, на поверхности которых имеются способные к обмену анионы, а с другой стороны - противоположный положительный заряд.

**Катод (Cathode):** При электролизе или электрохимической коррозии катодом является участок поверхности, где присутствующие в растворе катионы нейтрализуются электронами, превращаясь в элементы, либо осаждающиеся на поверхности, либо вступающие в реакцию с водой; эта реакция с водой является вторичной.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Каустик (Caustic soda):** Химикат, часто используемый для обработки воды, гидроксид натрия, едкий натр (щелок).

**Кек (Cake):** Обезвоженный осадок, получаемый после фильтрования, центрифуги или другого обезвоживающего устройства.

**Кислотность (Acidity):** Теоретически, избыток ионов  $H^+$  по сравнению с числом ионов  $OH^-$  в воде при  $pH < 7$ . Избыток ионов  $H^+$ , определяемый при анализе воды путем титрования при  $pH < 4,2 - 4,4$ , когда исчезает М щелочность (в конечной точке титрования с использованием метилоранжа).

**Коагуляции (Coagulation):** Нейтрализация зарядов на коллоидах (иногда считают, что это - флокуляция).

**Коалесценция (Coalescence):** Слияние коагулированных коллоидных частиц жидкости в одну непрерывную (однородную) фазу.

**Колилоподобная бактерия (Coliform bacteria):** Бактерия, обнаруживаемая в кишечном тракте теплокровных животных; присутствие этой бактерии в воде указывает на загрязнение воды.

**Коллоиды (Colloids):** Вещества, частицы которых имеют очень маленький размер; диаметр частиц, как правило, составляет от 10-5 до 10-7 см.

**Концентрация (Concentration):** Увеличение количества растворенных твердых веществ в единице объема раствора, обычно в процессе испарения жидкости; а также количество вещества, растворенного в единице объема раствора.

**Концентрационный элемент (Concentration cell):** Соединение двух растворов, имеющих одинаковый химический состав, но различную концентрацию, при помощи металлического проводника для получения тока в цепи.

**Конвекция (Convection):** Передача тепла посредством жидкости при циркуляции потоков.

**Конденсат (Condensate):** Вода, полученная в результате испарения и последующей конденсации.

**Консистенция (Consistency):** В целлюлозно-бумажной промышленности этот термин означает плотность пульпы (волоконистой массы) в весовых процентах сухого вещества.

**Коэффициент абсорбции натрия (Sodium absorption ratio, SAR):** Если речь идет об оросительной воде, то этот термин означает зависимость содержания натрия от жесткости воды; это может служить основой для предварительного определения пригодности этой воды для полива растений и почвы.

**Красный шлам (Red mud):** Породные примеси, образующиеся при обработке бокситов.

**Крекинг (Cracking):** Технологический процесс переработки (очистки) нефти с расщеплением больших молекул на молекулы меньшего размера.

**Критическое давление (Critical pressure):** Давление при критической температуре, при превышении которого флюид уже не имеет свойств жидкости, независимо от дальнейшего повышения давления.

**Лигнин (Lignin):** Основная нецеллюлозная составляющая древесины.

**Липофильный (Lipophilic):** Имеющий сродство к маслу. Антонимом является термин "гидрофильный" (т.е. гидрофобный).

**Массоловушка (Saveall):** Общее название устройств нескольких типов, применяемых для извлечения волокна из оборотной воды и осветления оборотной воды для повторного использования.

**Мгновенное (однократное равновесное) испарение (Flash):** Превращение части перегретой жидкости в пар при снижении давления.

**Мембрана (Membrane):** Перегородка, обычно тонкая, через которую проходят только частицы определенного размера или характера.

**Микроорганизм (Microorganism):** Организмы (микробы), видимые только под микроскопом; организмы большего размера, видимые невооруженным глазом, называют макроорганизмами.

**Минерал (Mineral):** Любое неорганическое или ископаемое органическое вещество, имеющее в естественном состоянии определенный химический состав и структуру.

**Минерализация (Salinity):** Присутствие в воде растворимых минеральных веществ.

**Моль (грамм-молекула) (Mole):** Единица веса или объема химического вещества, соответствующая его молекулярному весу. Вес одной грамм-молекулы воды-18 г, а образующийся при ее испарении пар при нормальной температуре и давлении занимает объем 22,4 л.

**Мономер (Monomer):** Молекула, обычно органическое соединение, обладающее способностью к соединению с некоторым числом идентичных молекул с образованием полимера.

**Мусор (Rag):** Остатки органических веществ на поверхности раздела между водой и нефтью.

**Мутность (Turbidity):** Суспензия мелких частиц, вызывающая затемнение (матирование) световых лучей, однако из-за очень малого размера частиц для их осаждения требуется несколько дней.

**Надосадочная жидкость (Supernate):** Жидкость над слоем осадка в отстойнике.

**Накипь (окалина) (Scale):** Осадок, образующийся на поверхностях при контакте с водой в результате физических или химических реакций.

**Насадка (Packing):** Наполнитель, находящийся в определенной части отпарного аппарата и представляющий собой элементы различной формы, начиная от простых элементов, таких как каменная наброска или хордовая насадка и кончая элементами сложной формы, имеющими большую площадь поверхности на единицу объема.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Нейтрализация (Neutralization):** Чаще всего, химическая реакция, в результате которой среда становится не кислой и не щелочной. Второе значение - добавление в воду поглотителя кислорода в избыточной концентрации для удаления растворенного в воде кислорода, являющегося причиной коррозии.

**Некарбонатная жесткость (Noncarbonate hardness):** Жесткость воды, обусловленная присутствием в воде хлоридов, сульфатов и нитратов кальция и магния.

**Неконденсирующиеся газы (Noncondensibles):** Газообразные вещества в составе водяного пара, не превращающиеся в жидкость в условиях, при которых происходит конденсация пара.

**Неочищенные сточные воды (Sewage):** Сточные воды в канализационном коллекторе.

**Несвободное оседание (Hindered settling):** Стадия оседания, на которой уплотнение осевших твердых веществ достигает такой степени, что вода с трудом выходит из этой массы и поэтому оседание замедляется.

**NSSC:** Способ варки нейтральной сульфитной полуцеллюлозы.

**NTA:** Нитрилотриацетная кислота, хелатообразователь, обычно используемый вместе с солью натрия.

**Обезвоживать (Dewater):** Удалять воду из ила с целью получения кека (осадка), который можно транспортировать как твердое вещество.

**Обеззараживание (Disinfection):** Использование источников энергии или химикатов для уничтожения патогенных организмов.

**Обессоливание (Desalination):** Удаление из воды неорганических растворенных твердых веществ.

**Обессоливание (Desalting):** Удаление солей из сырой нефти.

**Обмен веществ (Metabolism):** Биологический процесс превращения пищи, например, растворимых органических веществ, в клеточное вещество и газообразные побочные продукты.

**Обратный осмос (Reverse osmosis):** Способ возврата потока воды (под действием давления) обратно в процесс естественного осмоса, так что вода переходит из более концентрированного раствора в более разбавленный раствор.

**Объемная плотность (Bulk density) (сыпучих или пористых материалов):** Измеренное отношение плотности твердого вещества к его объему, с учетом или без учета имеющихся в массе вещества пустот, выраженное в фунтах/куб. футы или в кг/куб. метры.

**Окисление (Oxidation):** Химическая реакция, в ходе которой повышается положительная валентность какого-либо элемента или иона, отдающего электроны окислителю.

**Окклюзия (Occlusion):** Процесс поглощения, при котором происходит прочное сцепление одного твердого материала с другим; иногда этот процесс имеет место при соосаждении.

**Организмы, способные жить в разных условиях (Facultative organisms):** Микробы, которые могут приспосабливаться к жизни как в аэробных, так и в анаэробных условиях.

**ORP:** Окислительно-восстановительный потенциал. См. "Редокс потенциал".

**Осадок (Precipitate):** Нерастворимый продукт реакции; если речь идет о химической реакции в водном растворе, то продукт реакции обычно представляет собой кристаллическое соединение, которое осаждается по мере роста кристаллов.

**Осаждение (Sedimentation):** Гравитационное осаждение твердых частиц в жидкостной системе.

**Осмоз (Osmosis):** Прохождение воды через проницаемую мембрану, разделяющую два раствора различной концентрации; вода переходит в более концентрированный раствор.

**Основание (Base):** Щелочное вещество.

**Отбросный нефтепродукт (Slop oil):** В нефтеперерабатывающей промышленности - общее название для нефтепродуктов, сбрасываемых в канализационный коллектор для нефтезагрязненных вод во время отключения и пуска установки или при нарушениях режима работы.

**Открытый водовод (Flume):** Желоб или канал, выполняющие функцию водовода и предназначенные для измерения параметров потока.

**Коэффициент упаривания (Concentration ratio):** В системе испарения воды - отношение концентрации определенного вещества, содержащегося в подпиточной воде, к его концентрации в выпаренной воде; измерения обычно проводятся на линии частичного отвода воды.

**Отношение F/M (F/M ratio):** Отношение количества питательных веществ к массе микроорганизмов или к количеству микроорганизмов, на основе которого можно прогнозировать фазу роста, в которой находятся основные популяции микроорганизмов в процессе биологического переваривания.

**Очистка (Scouring):** Удаление остатков органических веществ с поверхности текстильного волокна.

**Пароперегреватель (Superheater):** Теплообменник, установленный в топке, для повышения температуры пара, выходящего из барабана котла.

**Пары (Fumes):** Аэрозоль с твердыми веществами в виде дисперсных коллоидов.

**Пастеризация (Pasteurization):** Способ уничтожения патогенных организмов путем термообработки в течение определенного периода времени.

**Патогенные организмы (Pathogens):** Болезнетворные микробы.

**Переброс (Carryover):** Присутствие котловой воды в водяном паре вследствие вспенивания или уноса капель воды.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Периодическая система элементов (Periodic chart):** Расположение элементов в порядке возрастания порядкового атомного номера (зарядового атомного числа), наглядно показывающее повторение (или периодичность) основных химических свойств.

**Планктон (Plankton):** Микроорганизмы с ограниченной способностью к передвижению, переносимые течением в водоеме с одного места на другое.

**Плотность в градусах Американского нефтяного института (АНИ) (API gravity):** Индекс относительной плотности по определению Американского нефтяного института.

**Поверхностно-активное вещество (Surfactant):** Поверхностно-активный агент: обычно органическое соединение, с одной стороны молекул которого имеется гидрофильная группа, а с другой стороны - липофильная группа.

**Подпрессовая жидкость (Stickwater):** Дистиллят, получаемый при варке мяса или при вытопке жира и шквары.

**Показатель концентрации водородных ионов (pH):** Способ выражения концентрации водородных ионов в значениях до 10; логарифм концентрации водородных ионов со знаком минус.

**Полимер (Polymer):** Цепь органических молекул, образовавшаяся в результате присоединения элементарных звеньев, так называемых, мономеров.

**Полифосфат (Polyphosphate):** Дегидратированный на молекулярном уровне ортофосфат.

**Полиэлектролит (Polyelectrolyte):** Полимерный материал, в структуре которого имеются центры ионного обмена.

**Поляризовать (Polarize):** В отношении коррозии, это означает создание на поверхности катода или анода барьера, препятствующего развитию коррозии.

**Пороговая обработка (Threshold treatment):** Борьба с накипью или отложениями путем добавления химикатов в субстехиометрических количествах.

**Проводимость (Conductivity):** Способность вещества проводить тепло или электрический ток. Удельная электропроводность обычно измеряется в микроси-менсах на сантиметр.

**Продувка (Blowdown):** Отвод воды из системы испарения воды для поддержания концентрации твердых примесей в заданных пределах.

**Промежуточный пароперегреватель (Reheater):** Теплообменник, установленный в печи, для повышения температуры пара из регулируемого отбора турбины в целях повторного использования.

**Промывка ила (Elutriation):** Промывка ила водой для удаления маточной жидкости.

**Проницаемость (Permeability):** Способность какого-либо тела пропускать жидкость под давлением.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Простейшие (животные) (Protozoa):** Микроскопические одноклеточные организмы, находящиеся в пищевой цепи выше, чем бактерии, и питающиеся бактериями.

**Пустая порода (Gangue):** Землистое вещество, остающееся в процессе обогащения руды.

**Радиация (Radiation):** Если речь идет о печи, то термин "радиация" означает передачу тепла посредством волн, очень похожих на другие формы электромагнитных волн (например, световые волны и радиоволны).

**Разделение (Resolution):** Расслоение эмульсии на отдельные компоненты.

**Разрешение NPDES (NPDES permit):** Разрешение, требуемое NPDES (Национальная система предотвращения сброса загрязняющих веществ, США) и выдаваемое Управлением охраны окружающей среды (EPA).

**Расплав (Smelt):** Расплавленный шлак; в целлюлозной промышленности - используемые при варке химикаты, выпущенные из котла-утилизатора в виде расплавленного вещества и растворенные в баке для расплава для получения зеленого щелока.

**Расщепление солей (Salt-splitting):** Способность анионита к превращению раствора соли в щелочь; способность катионита к превращению раствора соли в кислоту.

**Реверсия (Reversion):** Возврат дегидратированного на молекулярном уровне фосфата (полифосфата) в его первоначальную гидратную форму.

**Регенеративная печь (Recovery furnace):** Печь для сжигания щелока натронной варки из процесса сульфатной варки целлюлозы с целью регенерации используемых при варке химикатов и выделения их в виде расплава.

**Редокс-потенциал (Redox potential):** Окислительно-восстановительный потенциал, измеренный по отношению к стандартному электроду.

**Регенеративный нагрев (Regenerative heating):** На электростанциях общего пользования - схема снижения потерь тепла для главного конденсатора в цикле за счет использования пара из регулируемого отбора турбины для нагрева питательной воды. При инженерном проектировании - использование теплообменника для подогрева сырья для процесса путем отвода теплоты продукта.

**Руда (Ore):** Минерал, содержащий нужные вещества, которые могут быть из него извлечены.

**Светопроницаемость (Opacity):** Пропускание света факелом выбросов загрязнений в атмосферу, в процентах.

**Связанная вода (Connate water):** Реликтовая вода, добываемая с нефтью.

**Сезонное перемешивание слоев воды (Turnover):** Перемешивание нижнего и верхнего слоев воды в озере, которое происходит весной и осенью вследствие уравнивания температуры и плотности.

**Сепаратор АНИ (API separator):** Простой нефтезаводской отстойник-ловушка, соответствующий уровню проектирования Американского нефтяного института в области очистки сточных вод от нефти и твердых примесей.

**7Сернистая вода (Sour water):** Сточные воды, содержащие вещества с неприятным запахом, чаще всего, сернистые соединения.

**Синергизм (Synergism):** Взаимное усиление действия при использовании нескольких химикатов в качестве добавок по сравнению с действием каждой из добавок.

**Сеточная бумагоделательная машина (Fourdrinier):** Конструкция бумагоделательной машины со сплошной проволочной сеткой для получения бумажных листов.

**Синтетическое топливо (Synfuels):** Жидкое или газообразное топливо, полученное из угля, лигнита или других источников нелетучего углерода.

**Скоординированная программа обработки фосфатом (Coordinated phosphate):** Программа обработки котловой воды буферными растворами фосфатов во избежание гидроксильной щелочности.

**Смешиваемость (Miscibility):** Способность двух взаимно нерастворимых жидкостей к смешиванию.

**Снижение липкости (Detackify):** Обработка твердых тел после извлечения из камеры покраски распылением с целью устранения липкости.

**Снижение щелочности (Dealkalization):** Любая обработка воды с целью снижения щелочности.

**Спора (Spore):** Репродуктивные клетки или семена, которыми размножаются водоросли, грибковые организмы или простейшие животные.

**Соединение ионов металлов в хелатные комплексы (Sequester):** Образование устойчивого водорастворимого комплексного соединения.

**Стехиометрический (Stoichiometric):** Отношение химических веществ, вступающих в реакцию в воде, соответствующее их соединительной (эквивалентной) массе для теоретической химической реакции.

**Сульфатная варочная жидкость (White liquor):** Варочный раствор из процесса сульфатной варки целлюлозы, полученный путем повторной каустификации зеленого щелока известью.

**Суспензия (Slurry):** Вода с высокой концентрацией взвешенных веществ, как правило, превышающей 5000 мг/л.

**Сцежа (Blowpit):** Резервуар, в который после варки подается древесная целлюлоза из варочного котла.

**Твердый отстой и вода (BS&W, bottom sediment and water):** Критерий качества нефти, определяемый на основе количеств осадка и воды в объемных процентах, которые можно выделить из пробы центрифугированием.

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Тепловая мощность (Heat rate):** Этот термин используется, когда речь идет о преобразовании тепловой энергии в мощность, измеряемую в британских тепловых единицах/кВтч. Теоретическое преобразование - 3413 британских тепловых единиц/кВтч.

**Теплопроводность (Conduction):** Передача тепла через какое-либо тело в процессе молекулярного движения.

**Теплосодержание (Sensible heat):** Степень нагрева, определяемая только путем измерения температуры.

**Термоклин (Thermocline):** Слой в озере, отделяющий верхнюю зону, где происходит перемешивание воды течениями, от нижней застойной зоны с более низкой температурой.

**Технология варки крафт-целлюлозы (Kraft):** Способ натронной варки целлюлозы с добавлением сульфата натрия.

**Травильный раствор (Pickle liquor):** Кислота, применяемая для обработки стали с целью удаления окисной окалины.

**Транспирация (Transpiration):** Дыхание растений.

**Трубка Вентури (Venturi):** Устройство для измерения расхода жидкости, состоящее из короткого сужающегося конуса и находящегося на той же оси длинного расширяющегося конуса. Это устройство применяют также при мокрой очистке газов.

**Туман (Mist):** Аэрозоль с частицами жидкости в виде дисперсных коллоидов.

**Увлажнение (Humidification):** Добавление в воздух водяного пара.

**Удаление типографской краски (Deinking):** Способ удаления печатной краски со вторичного волокна.

**Умягчение (Softening):** Устранение жесткости воды (удаление кальция и магния).

**Унос (Entrainment):** Перенос воды в поток газа. В котле это - присутствие котловой воды в водяном паре вследствие вспенивания или уноса капель воды (carryover); в градирне - унос воды с выбросами из вытяжной трубы градирни с естественной тягой (drift).

**Унос воды (Drift):** Унос воды с выбросами из вытяжной трубы градирни с естественной тягой.

**USDA:** Министерство сельского хозяйства США.

**USGS:** Министерство геологии США, отдел, занимающийся земными недрами.

**Уравнивание (Equalization):** Минимизация изменений расхода и состава жидкости путем отведения части жидкости в промежуточный резервуар для хранения.

**Утечка (Leakage):** Присутствие различных ионов в питательной воде, подаваемой на ионообменник.

**FDA:** Управление по контролю за качеством пищевых и фармацевтических продуктов.

**Фермент (Enzyme):** Если речь идет о воде, то это - химический продукт, производимый живыми клетками и способный уменьшать большие органические молекулы до элементов достаточно малого размера, диффундирующих через клеточную мембрану.

**Ферментация (Fermentation):** Превращение органического вещества под действием анаэробных бактерий в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и подобные им низкомолекулярные соединения.

**Фильтрат (Filtrate):** Профильтрованная жидкость, остающаяся после удаления осадка твердых веществ, образующегося на фильтре.

**Фильтрация (Filtration):** Способ выделения твердых веществ из жидкости при помощи пористого вещества, через которое проходит только жидкость.

**Флокуляция (Flocculation):** Способ агломерации коагулированных частиц с образованием осаждающихся хлопьев, обычно студенистого характера.

**Флотация (Flotation):** Способ выделения твердых веществ из воды путем вспенивания в резервуаре, в процессе которого твердые частицы присоединяются к пузырькам воздуха и всплывают на поверхность, где их можно собрать.

**Фотосинтез (Photosynthesis):** Процесс превращения диоксида углерода и воды в углеводы, протекающий под действием солнечного света в присутствии хлорофилла, и с выделением свободного кислорода.

**Хвосты (Tailings):** Отходы обогащения руды, остающиеся после извлечения из руды ценных компонентов.

**Хелатообразователи (Chelating agents):** Органические соединения, способные акцептировать ионы из водных растворов с образованием растворимых комплексов.

**ХПК (COD):** Химическая потребность в кислороде, показатель содержания в воде органических веществ и других восстановителей.

**Целлюлоза (Pulp):** Волокнистый материал.

**Цикл Ренкина (Rankine cycle):** Последовательные изменения теплосодержания и температуры в процессе превращения воды в пар, расширения посредством первичного двигателя генератора, конденсации и возврата в котел.

**Циклы концентрации (Cycles of concentration):** Относительная концентрация.

**Число Авогадро (Avogadro's number):** Число молекул в 1 грамм-молекуле какого-либо вещества,  $6,02 \times 10^{23}$ .

**Шлак (Slag):** В металлургической промышленности - примеси, выделяемые из расплавленного металла в процессе рафинирования; в топках котлов - негорючая часть золы, достигшая температуры плавления (топочный шлак).

## СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Шлихтование (Sizing):** Отделка поверхности волокон для производства бумаги и текстиля, например, обработка крахмалом.

**Щелок натронной варки (Black liquor):** Варочный раствор, возвращаемый из промывных аппаратов для промывки бурой древесной массы на целлюлозном заводе.

**Щелочность (Alkalinity):** Общая щелочность (или М щелочность) - это, по определению, щелочные компоненты, вступающие в реакцию с кислотой, когда значение рН пробы уменьшается до значения рН в конечной точке титрования с использованием метилоранжа - примерно до  $\text{pH} = 4,2$ . Еще один важный термин - Р щелочность, которая имеет место при значении  $\text{pH} > 8,2$  и представляет собой щелочные компоненты, вступающие в реакцию с кислотой при уменьшении значения рН пробы до 8,2.

**Эвтрофикация (Eutrophication):** Обогащение воды веществами, способствующими зарастанию водоема водными растениями и, в конечном счете, засорению и обескислороживанию водоема.

**Эквивалентная масса (Equivalent weight):** Масса вещества в граммах, которая соединяется с одним граммом водорода или замещает один грамм водорода; эквивалентную массу обычно определяют путем деления формульной массы (молекулярного веса по формуле соединения) на валентность.

**Экзотермический (Exothermic):** С выделением тепла.

**Экономайзер (Economizer):** Теплообменник в шахте печи, обеспечивающий передачу тепла топочного газа питательной воде котла.

**Электролит (Electrolyte):** Вещество, которое при растворении в воде диссоциирует на два или несколько ионов.

**Элюирование (Elution):** Способ извлечения одного твердого вещества из другого. Этот термин часто неправильно используют при описании регенерации ионообменника.

**Эмульсия (Emulsion):** Коллоидная дисперсия одной жидкости в другой.

**Эндотермический (Endothermic):** С поглощением тепла.

**Энтальпия (Enthalpy):** Общее теплосодержание какого-либо тела.

**Энтропия (Entropy):** Математическое выражение пределов возможности использования энергии; показатель хаотического движения материи.

**Этилендиаминтетрауксусная кислота (EDTA):** Обычно этот хелатообразователь применяется в виде соли натрия.

**Эффект Доннана (Donnan effect):** Ослабление диффузии внешних ионов при использовании полупроницаемой мембраны вследствие высокой внутренней концентрации ионов с одинаковым зарядом.

**Яма-отстойник для окалины (Scale pit):** Сборник, расположенный вдоль прокатного стана, в который поступает охлаждающая вода, содержащая прокатную металлическую окалину.