

ББК 38.96  
И 20  
УДК 628.174.614.84

Печатается по решению секции литературы по пожарной охране редакционного совета Стройиздата

Рецензент — начальник КБ «Пожарная техника» ВНИИПО МВД СССР, доктор техн. наук, проф. В. В. Дьяков.

**Иванов Е. Н.**

**И 20** Противопожарное водоснабжение — М.: Стройиздат, 1986 — 316 с., ил.

Обобщены и систематизированы научные исследования и практический опыт проектирования, строительства и эксплуатации систем, сооружений и оборудования противопожарного водоснабжения городов, сельских населенных мест, промышленных предприятий, общественных и административных зданий, сооружений с массовым пребыванием людей и пожароопасных объектов новостроек. Даны приемы техники экономического анализа систем водоснабжения, используемых для противопожарных целей.

Для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования, сооружения и эксплуатации систем противопожарного водоснабжения различных отраслей хозяйства.

**И** 3405000000—239 188—86  
047(01)—86

**ББК 38.96**  
**6С9.6**

©Стройиздат, 1986

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года предусматривают необходимость всемерного ускорения научно-технического прогресса. Актуальные задачи науки и техники предстоит решить в результате перевода экономики на рельсы всесторонней интенсификации и повышения технического уровня производства. Своевременное внедрение в народное хозяйство принципиально новых технологий позволит снизить энерго- и материалоемкость производства.

Непрерывное развитие пожаро- и взрывоопасных производств химической, нефтяной, нефтехимической отраслей промышленности, широкое применение в производстве и быту синтетических материалов, тенденции увеличения площадей и этажности производственных, административных, общественных и жилых зданий требуют усиленного внимания со стороны государства, партийных, советских, общественных, охранных органов к вопросам профилактики, предупреждения пожаров и необходимых условий для их успешного тушения.

Эти важные государственные задачи определены постановлением Совета Министров СССР «О мерах по повышению пожарной безопасности в населенных пунктах и на объектах народного хозяйства», принятом 15 июля 1977 г. Претворение этого постановления в жизнь органически связано с перспективами экономического и социального развития нашей страны в двенадцатой пятилетке и на период до 2000 года.

Системы противопожарного водоснабжения представляют собой комплекс сложных технических устройств, обеспечивающих пожарную безопасность людей, технологического оборудования и материальных ценностей.

Задачи противопожарной защиты объектов современных отраслей промышленности усложняются в связи с концентрацией производственных и энергетических мощностей, увеличением вместимости товарно-материальных складов, применением в строительстве облегченных конструкций из металла и полимерных материалов с низким пределом огнестойкости. Достижения в развитии техники противопожарного водоснабжения способствовали выделению ряда проблемных вопросов в новое перспективное направление теории водоснабжения и гидравлики оборудования противопожарных водопроводов. Это потребовало нового подхода к решению проблемы повышения эффективности систем противопожарного водоснабжения и создания научно обоснованных требований и принципов их проектирования. Необходимо было выявить пути интенсификации процессов эффективного использования воды и рациональной ее подачи и распределения, усовершенствовать существующие и разработать новые расчетные методы и принципы построения высокоэффективных систем противопожарного водоснабжения, применить новое высокоэффективное оборудование водопроводных сооружений, а также функциональные и технологические модели автоматизированных систем противопожарного водоснабжения с теоретическим обоснованием их построения.

Основное содержание книги направлено на решение теоретических и практических задач, выдвигаемых народным хозяйством страны.

# Глава 1. ПОТРЕБИТЕЛИ ВОДЫ И ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ВОДОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ И ОБОРУДОВАНИЯ

Расчет требуемого объема воды — первоочередная задача при проектировании, так как от правильного ее решения зависят эффект системы противопожарной защиты и технико-экономические показатели противопожарного водоснабжения.

Достижения в развитии техники водоснабжения и оборудования для подачи воды, а также создание новых химических добавок (пенообразователей, смачивателей, загустителей и др.), повышающих эффект применения воды при тушении пожаров, потребовали разработки методов определения потребного количества воды для пожарных целей.

Потребление воды для тушения пожаров колеблется в зависимости от площади очага пожара, категории пожарной опасности объекта, рациональности использования техники для подачи воды и др. Расход воды для тушения пожаров играет важную роль при расчете параметров технических средств подачи воды и разработке требований бесперебойного водоснабжения во время тушения пожаров. Из-за многообразия и малой достоверности информации о режимах водопотребления зачастую принимают субъективные решения, что отрицательно отражается на эффективности системы противопожарного водоснабжения.

Для тушения пожаров воду используют в виде сплошных и капельных водяных струй. В очаг горения воду подает оператор, используя передвижные или стационарные технические средства подачи. Воду можно подавать через специальные оросители в самой начальной стадии возникновения пожара. Воду используют также и в установках, предназначенных для создания условий пожарной безопасности (например, для ограничения интенсивности теплового излучения пламени пожара, снижения температуры нагретых газов, защиты пожароопасного технологического оборудования путем охлаждения его водой, а также создания безопасных условий при аварийно-спасательных работах). Широко используют водяные, паровые и аэродисперсные завесы, защитное действие которых основано на погло-

щении и рассеянии энергии теплового излучения пламени пожара.

Орошение при пожаре несущих строительных конструкций капельными водяными струями позволяет сохранить их прочность. Основным параметром оборудования водоорошения является интенсивность подачи воды для поглощения тепла, воспринимаемого конструкцией, установкой или аппаратом во время пожара.

Облегченные стальные конструкции замкнутого профиля защищают от огня наполнением их водой. Основным показателем, характеризующим огнестойкость водонаполненных стальных конструкций, является расход воды для поглощения тепла, воспринимаемого конструкцией во время пожара. Условия использования воды для пожарных целей весьма разнообразны, поэтому целесообразно подразделить общую задачу определения потребности в воде на ряд самостоятельных задач, характерных для каждой конкретной области ее применения в пожарном деле.

## 1. ВИДЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ВОДЫ

На территории города, поселка, промышленного предприятия расположены водопотребители различных категорий, предъявляющие неодинаковые требования к качеству и количеству потребляемой воды.

Водопотребители делятся на три основные категории: хозяйственно-питьевые, производственные (для удовлетворения технических целей на предприятиях промышленности, транспорта, энергетики), пожарные для создания пожаро-взрывобезопасных условий жилого и производственного сектора города.

Для тушения пожаров водой используют:

передвижные средства тушения пожаров [воду в очаг пожара подают операторы (ствольщики) по временно проложенным насосно-рукавным системам];

стационарные установки тушения пожаров в зданиях (с автоматическим, полуавтоматическим и ручным включением подачи воды);

установки водопенного тушения пожаров;

установки для тушения пожаров водно-химическими растворами;

оборудование для создания водяных завес, предотвращающих опасность теплового излучения пламени или снижающих температуру нагретых газов;



оборудование водоорошения для повышения огнестойкости строительных конструкций и технологических установок во время пожара;

оборудование водонаполнения стальных конструкций замкнутого профиля.

Процесс подачи воды для тушения пожаров и создания условий пожарной безопасности зависит от: пожарной опасности горючих веществ и материалов, площади пожара, характера объемно-планировочных и строительных решений, квалификации операторов и опыта организации тактических решений при подаче воды передвижными средствами, уровня оснащения техническими средствами для отбора, подачи и распределения воды на пожаре и других факторов. При определении требуемого количества воды выбирают наиболее весомые факторы, достаточно объективно отражающие процессы горения и тушения пожаров и вероятностный характер процесса потребления воды на пожарные нужды.

При решении задачи использования воды на пожарные нужды ее подразделяют на частные подзадачи. Для математического описания используют два метода. Первый основан на использовании физико-химических закономерностей, второй — на описании процесса с помощью математических выражений, учитывающих случайные факторы.

Первый метод основан на изучении процессов тепло- и массопереноса при возникновении пожара. Математическое описание в этом случае состоит из уравнений материального и теплового балансов. Например, в основу описания процесса тушения пожара положено уравнение теплового баланса, а процесса повышения огнестойкости конструкций водонаполнением — уравнение теплопередачи от среды пожара к наружной поверхности водонаполненной конструкции.

## 2. НОРМЫ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Для обеспечения гарантированной и бесперебойной работы водопровода во время пожара его водопроводные сооружения и оборудование рассчитывают на пропуск требуемого количества воды. Причем сооружения должны подавать воду под соответствующим напором в течение времени, достаточного для тушения пожара.

Параметры водопроводных сооружений противопожарного водопровода определяют на пропуск расхода воды, необходимой для внутреннего, наружного и автоматического тушения пожаров:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{а}},$$

где  $Q_{\text{в}}$  — расход воды для тушения пожаров внутри зданий (от внутренних пожарных кранов),  $Q_{\text{н}}$  — расход воды для тушения наружных пожаров (от пожарных гидрантов);  $Q_{\text{а}}$  — расход воды для тушения пожаров автоматическими или стационарными установками

### Расход воды для тушения пожаров передвижными средствами

Расход воды для тушения пожара зависит от характера развития пожара и условий подачи воды в очаг горения. Чем выше пожарная опасность объекта, тем больше требуется воды для тушения пожара. Подавая в очаг пожара значительное количество воды, можно ликвидировать его в течение сравнительно короткого промежутка времени. Однако для строительства водопроводов, рассчитанных на пропуск большого количества воды, необходимы значительные материальные затраты. Если предусмотреть незначительные расходы воды для тушения пожаров, можно сократить капитальные затраты на строительство водопровода, но при этом трудно создать нормальные условия для борьбы с пожарами. Пожары в этих случаях носят затяжной характер и сопровождаются большими ущербами от уничтожения огнем материальных ценностей, нарушения нормального технологического цикла при аварии, вызванной пожаром. Поэтому расход воды для тушения пожаров назначают в зависимости от пожарной опасности объекта и его значимости, а также исходя из условия обеспечения требуемой пожарной безопасности при наименьших затратах на строительство и эксплуатацию противопожарных водопроводов. Расход воды для тушения пожара приведен в нормативных документах, которые составлены на основании обработки статистических данных о фактических расходах воды с учетом создания требуемых условий тушения пожаров на различных объектах.

Ниже приведены данные о фактическом расходе воды для тушения пожаров на открытых технологических установках:

Число пожаров, % . . . . .	70	85	90	94	95	97
Расход воды, л/с . . . . .	44	60	81	98	116	128

**Таблица 1. Расход воды для тушения наружных пожаров в населенных пунктах городского типа**

Число жителей в населенном пункте, тыс. чел.	Расчетное число одновременных пожаров	Расход воды, л/с, для тушения пожара в зданиях высотой	
		до двух этажей (включительно)	3 этажа и выше
5	1	10	10
10	1	10	15
25	2	10	15
50	2	20	25
100	2	25	35
200	3	—	40
300	3	—	55
400	3	—	70
500	3	—	80
600	3	—	85
700	3	—	90
800	3	—	95
1000	3	—	100
2000	1	—	100

Расход воды для тушения пожаров в населенных местах зависит от численности населения и характера застройки (табл. 1).

Расход воды для наружного пожаротушения в производственных зданиях с фонарями и в зданиях шириной до 60 м без фонарей зависит от объема здания, степени огнестойкости его строительных конструкций, а также категории пожарной опасности производства, размещенного в здании (табл. 2).

Параметры водопроводных сооружений рассчитывают исходя из условия одновременности возникновения пожаров на промышленном предприятии, которую принимают при площади территории предприятия менее 150 га — один пожар, более 150 га — два пожара. Расход воды для наружного пожаротушения в производственных зданиях шириной 60 м без фонарей и более принимают в соответствии с данными табл. 3.

Для крупных промышленных предприятий (например, нефтеперерабатывающих заводов, химических комбинатов) создают самостоятельные системы водоснабжения, которые не связаны с городским водопроводом

Таблица 2. Расход воды для тушения пожаров в производственных зданиях

Степень огнестойкости здания	Категория производства по пожарной опасности	Расход воды, л/с, для тушения пожара в здании объемом, тыс. м <sup>3</sup>						
		до 3	до 5	до 20	до 50	до 200	до 400	более 400
I и II	Г, Д	10	10	10	10	15	20	25
I и II	А, Б, В	10	10	15	20	30	35	40
III	Г, Д	10	10	15	25	35	—	—
III	В	10	15	20	30	40	—	—
IV и V	Г, Д	10	15	20	30	—	—	—
IV и V	В	15	20	25	40	—	—	—

Таблица 3. Расход воды для тушения пожаров в зданиях без фонарей

Степень огнестойкости здания	Категория пожарной опасности	Расход воды, л/с, для тушения пожара в здании объемом, тыс. м <sup>3</sup> , до								
		50	100	200	300	400	500	600	700	800
I и II	А, Б и В	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I и II	Г и Д	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Таблица 4. Суммарный расход воды для тушения пожаров в производственных зданиях

Назначение расхода воды	Расход воды, л/с, для тушения пожара в здании объемом, тыс. м <sup>3</sup> , до							
	100	200	300	400	500	600	700	800
Наружное пожаротушение	30	40	50	60	70	80	90	100

Расход воды на наружное тушение пожаров в таких случаях определяют в соответствии с Противопожарными техническими условиями строительного проектирования (ПТУСП). Противопожарные водопроводы таких предприятий обычно рассчитывают исходя из условия подачи воды в пожарные автомобили (при системе низкого давления), для подачи воды пожарными гидрантами (при системе высокого давления), для работы лафетных стволов, а также для тушения пожаров внутри зданий с помощью внутренних пожарных кранов и стационарных систем водяного или пенного тушения пожаров.

### Расход воды для тушения пожаров внутри зданий

Расход воды на тушение пожаров внутри жилых, общественных, производственных и вспомогательных зданий принимают в зависимости от производительности (расхода) струи и числа одновременно действующих струй

Расход воды для внутреннего пожаротушения (л/с на одну струю) в зависимости от вида здания и числа подаваемых струй приведен ниже:

	Число струй	Расход воды
Жилые здания высотой 17—25 этажей . . .	3	5
» » » более 25 » . . . . .	6	5
Административные здания высотой более 50 м и объемом до 50 тыс. м <sup>3</sup> . . . . .	4	5
Административные здания высотой более 50 м и объемом более 50 тыс. м <sup>3</sup> . . . . .	8	5
Гостиницы, пансионаты, санатории, дома отдыха высотой более 50 м . . . . .	3	5
Производственные здания и гаражи высотой до 50 м . . . . .	2	2,5
Производственные и вспомогательные здания промышленных предприятий высотой более 50 м . . . . .	8	5

Для тушения пожаров внутри зданий предусматривают внутреннее пожаротушение в общежитиях, гостиницах, пансионатах, административных зданиях, школах-интернатах, санаториях, домах отдыха, больницах и других лечебно-профилактических учреждениях, дет-

ских садах-яслях, детских домах, домах ребешка, домах пионеров, спальных корпусах пионерских лагерей и школ-интернатов, музеях, библиотеках, выставочных павильонах, магазинах, кинозалах, предприятиях общественного питания и бытового обслуживания, учебных заведениях, вспомогательных зданиях промышленных предприятий высотой 40—50 м и объемом более 25 тыс м<sup>3</sup>, помещениях, расположенных под трибунами на стадионах, спортивных залах объемом более 25 тыс м<sup>3</sup>, конференц-залах и актовых залах более 700 мест и актовых залах и конференц-залах, оборудованных стационарной аппаратурой, при вместимости более 500 мест

Зачастую внутренние противопожарные водопроводы обеспечивают потребность в воде не только для наружного и внутреннего тушения пожаров, но и для работы установок автоматического тушения пожаров (спринклерно-дренчерных установок, установок тушения пожаров распыленной водой, установок водопенного тушения пожаров). В этих случаях водопровод можно использовать как вспомогательный или основной водопитатель. В табл. 4 приведен суммарный расход воды, необходимой для тушения пожара в бесфопарных производственных зданиях шириной более 6 м.

Расход воды для питания спринклерно-дренчерного оборудования принимают в соответствии с результатами гидравлического расчета систем подачи и распределения воды.

Нормативные требования к расходу воды для тушения пожаров периодически изменяют по мере совершенствования характера строительства, внедрения новых технических средств для борьбы с пожарами, интенсификации пожароопасных производственных процессов и др., причем в отдельных случаях возможно уменьшение требуемого количества воды для тушения пожаров, а в других случаях существенное его увеличение. Это положение подтверждают исследования Н. А. Тарасова-Агалакова, О. М. Курбатского, Н. А. Шелудько и других авторов.

## Расчет требуемого количества воды по зарубежным данным

Расход воды для тушения пожаров в населенных местах и на промышленных предприятиях США установлен Национальным советом страхования от огня (National Board of Fire Underwriters NBFU).

Ниже приведен расход воды (л/с) на наружное тушение пожара (по требованиям NBFU) в зависимости от степени воздействия пламени:

Малозаселенные районы	Слабая Умерен- Сильная		
	ная		
Жилые здания (два этажа и менее) . . . . .	32	64	96
Жилые здания (три этажа) . . . . .	64	96	160
Среднезаселенные районы			
Жилые и административно-хозяйственные здания (два этажа и менее) . . . . .	96	123	160
Жилые и административно-хозяйственные здания (свыше четырех этажей) . . . . .	160	240	320
Плотнозаселенные районы			
Жилые и административно-хозяйственные здания (свыше четырех этажей) . . . . .	200	290	380

Расход воды для тушения пожаров промышленных зданий по требованиям NBFU оценивают в зависимости от площади здания, его этажности, условий воздействия пожара на соседние здания (противопожарные разрывы), огнестойкости строительных конструкций, пожарной опасности производства и др.

Для плотнонаселенных торговых, деловых и производственных районов, где более вероятны значительные ущербы от пожаров, для расчета пожарного расхода воды (галл/мин) рекомендуется формула Фримана:

$$Q_{\text{мал с}} = 250(N^{1/5} + 10), \quad (1)$$

где  $N$  — численность населения тыс чел

Формула Хазена и Куичлинга рекомендуется для расчета требуемого для тушения пожара числа пожарных струй (при расчетной производительности струи 16 л/с):

$$v = 2,8 \sqrt{N}. \quad (2)$$

Наиболее распространенной в США и Канаде является формула NBFU, которая дает возможность определить расход воды для тушения пожаров в зависимости от численности населения района города:

$$Q = 1020 \sqrt{N} (1 - 0,01 \sqrt{N}). \quad (3)$$

Расход воды для тушения пожаров, определяемый по формулам (1) — (3), учитывает вероятность потерь воды в случае повреждения какого-либо участка водопровода и достигает 1000 л/с и более (рис. 1).

В связи с коренным изменением характера застройки и планировки городов после второй мировой войны пожарную опасность зданий оценивают не столько в зависимости от численности населения, сколько в зависимости от важности и размеров зданий, их объемно-планировочных решений, а также огнестойкости и возгораемости строительных конструкций.

Во Франции расход воды для тушения пожаров рассчитывают по формуле

$$Q = 100 + C \sqrt{A},$$

где  $Q$  — расход воды, м<sup>3</sup>,  $C$  — коэффициент, характеризующий последствия пожара ( $C=1,5-5$ ),  $A$  — площадь пожара, м<sup>2</sup>

Более современные нормы расхода воды для тушения пожаров разработаны Международным комитетом стандартизации ISO. В основу этих норм положены результаты обработки многочисленных статистических данных о тушении пожаров в США. Расход воды для тушения пожаров  $Q$  (галл/мин) по нормам ISO рассчитывают в зависимости от площади  $A$  (фут<sup>2</sup>) и параметра  $C$ , характеризующего пожарную опасность здания ( $C=0,6-1,5$ ):

$$Q = 18C \sqrt{A}.$$

Значения  $Q$  по нормам ISO, пересчитанные автором в принятую в СССР систему единиц, значительно превышают расходы воды для тушения пожаров, которые принимают в СССР в соответствии с требованиями СНиП. Из обзора принципов оценки норм расхода воды для тушения пожаров можно сделать вывод о необходимости совершенствования существующей системы нормирования с учетом дополнительных факторов, позволяющих более точно определить потребность в воде для тушения пожаров.

Анализ действующих отечественных и зарубежных норм, а также результатов исследований, проведенных



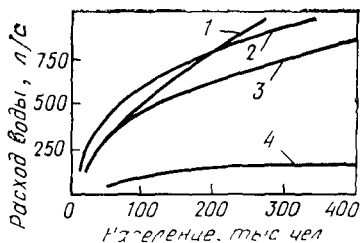


Рис 1 Зависимость расхода воды для тушения пожаров от численности населения района города

1 — по Фриману; 2 — по NBFU, 3 — по Хазену Куичлингу; 4 — по СНиП

различными авторами, свидетельствует о разном подходе к решению задачи и противоречивых результатах. Фактические расходы воды для тушения пожаров в ряде случаев значительно превышают нормативные (по действующим отечественным нормам), но в то же время они значительно меньше тех, которые получают по формулам ISO, NBFU, Фримана, Хазена и Куичлинга. Следует отметить, что нормативы не отражают и не используют вероятностной оценки в отношении допустимого уровня водообеспечения, базируются на разнотипных факторах, которые недостаточно полно характеризуют процесс подачи воды при тушении пожара. В связи с этим представляет интерес анализ работ по прогнозированию режима водопотребления при тушении пожаров

## Прогнозирование водопотребления

Водопотребление при тушении пожаров характеризует определенную последовательность подачи воды, которая объединяет три этапа: приведение передвижных средств тушения в действие, локализация пожара и его ликвидация. Каждому этапу присущи определенные признаки: первому — число и протяженность рукавных линий, необходимых для подачи требуемого количества воды от пожарных гидрантов до очага пожара; второму — периметр пожара (фронт распространения огня)  $P_p$  и скорость развития пожара  $U_p$ ; третьему — удельный расход воды для тушения пожара  $I$ . На основе обработки экспериментальных данных о развитии пожаров в зданиях получена эмпирическая формула для определения скорости развития пожара в здании  $U_p$ , содержащем твердые сгораемые материалы (характеристика которых близка к показателям пожарной опасности древесины):

$$U_p = \Omega m^* (Sh)^r (SL)^y,$$

$$U_{п}^n = U_{п} [1 + B (V_{в}/U_{п})^{0,3}],$$

где  $\Omega$ ,  $x$ ,  $y$  - константы и параметры определяемые экспериментально  
 $m^*$  - удельная скорость выгорания материалов кг (м<sup>2</sup>·с) (относительная к по-  
 верхности горения),  $S$  - поверхность сгораемых материалов в объеме м/м<sup>2</sup>;  
 $H$  - высота штабеля сгораемых материалов, м,  $L$  - длина (периметр) фрон-  
 та пламени, м,  $V_{п}$  - скорость ветра,  $U_{п}^n$  - скорость развития пожара объ-  
 ектов, расположенных на открытом воздухе (вне зданий)  $B$  - константа,  
 характеризующая объект

Условие локализации (ограничение возможности распространения огня и создание условий для его ликви-  
 вдации) пожаров при достаточной интенсивности водо-  
 обеспечения ( $I_{ф} \geq I_{т}$ ) П. М. Евтюшкин и В. М. Пана-  
 рин предложили описать уравнением

$$\int_0^{\tau_1} V_{т} d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} V_{ф} d\tau = C,$$

где  $V_{т}$  - требуемая скорость увеличения подачи воды ( $V_{т} = I_{т} U_{п}$ ), м<sup>3</sup>/с,  
 $V_{ф}$  - фактическая скорость увеличения подачи воды в период локализа-  
 ции ( $V_{ф} = I_{ф} U_{п}$ ), м<sup>3</sup>/с

Это уравнение является основой для выявления за-  
 кономерностей, характеризующих режим подачи воды  
 при пожаротушении. Наиболее характерными фактора-  
 ми, определяющими расход воды на этапе локализации  
 пожара, являются площадь пожара  $A$ , скорость разви-  
 тия пожара  $U_{п}$  и продолжительность  $\tau$ , которые связа-  
 ны между собой следующими выражениями.

$$A = 0,35\tau^{2,56}, \quad U_{п} = 0,896\tau^{1,56} \quad (0 < \tau \leq 30 \text{ мин});$$

$$A = 2300(\tau - 30)^{0,168}, \quad U_{п} = 387(\tau - 30)^{0,832} \quad (30 < \tau \leq 80 \text{ мин})$$

В ряде случаев потребление воды характеризуется  
 не столько параметрами пожара, сколько случайными  
 факторами, определяющими техническое состояние тех-  
 ники и психологическое состояние пожарных. Практика  
 показывает, что количество расходуемой во время  
 реального пожара воды в 4—5 раз превышает количе-  
 ство воды, расходуемой при тушении опытных пожаров.  
 Потребление воды при тушении пожаров в реальной  
 обстановке достигает 500—875 л/м<sup>2</sup>. Потребление воды  
 резко возрастает при тушении крупных пожаров. На  
 основании статистических данных установлена зависи-  
 мость для определения числа водяных струй и продол-  
 жительности подачи воды для таких условий:

$$y = 0,1 + \bar{A},$$

$$\tau = \bar{A}.$$

На основе обработки статистических данных установ-  
 лено, что расход воды для тушения пожара (л/с) зави-

сит в основном от объема  $W$  ( $\text{м}^3$ ) горящего помещения:

$$Q = 0,0223W.$$

Рассмотренные данные свидетельствуют о преобладающем влиянии случайных факторов на процесс водопотребления при тушении пожаров передвижными средствами, поэтому вопросы водопотребления целесообразно рассматривать с привлечением аппарата теории вероятностей и математической статистики.

### **Расход воды на хозяйственно-бытовые и производственные нужды.**

#### **Неравномерность водопотребления**

Подача воды из коммунального водопровода должна быть достаточной для обеспечения: хозяйственно-бытовых нужд в жилых зданиях; водопотребления в общественных зданиях; расхода на поливку улиц и насаждений, на работу фонтанов и т. п.; хозяйственно-питьевого водопотребления на предприятиях; водопотребления промышленных предприятий, получающих воду для технологических нужд от городского водопровода и т. п.

Нормы потребления воды (количество воды, расходуемой водопотребителем в течение суток) принимают в соответствии с требованиями СНиП в зависимости от степени благоустройства жилых зданий и от тепловыделения производственных цехов.

Расходы воды на производственные нужды промышленных предприятий принимают на основании сведений промышленных предприятий или данных проектных институтов, разрабатывающих технологию производства.

Средний суточный расход воды  $Q_{\text{сут}}^{\text{ср}}$  в населенном месте зависит от нормы водопотребления и расчетного числа жителей:

$$Q_{\text{сут}}^{\text{ср}} = q_{\text{ср.сут}} M,$$

где  $q_{\text{ср.сут}}$  — среднесуточная норма водопотребления,  $M$  — число жителей на расчетный период

Суточный расход воды на технологические нужды промышленного предприятия определяют по формуле

$$Q_{\text{сут}}^{\text{пр}} = q_0 n \tau,$$

где  $q_0$  — норма водопотребления на единицу продукции,  $n$  — часовая продукция предприятия,  $\tau$  — число часов работы предприятия в сутки

Расходование воды в населенных местах и предприятиях происходит неравномерно в течение суток года и в течение часов суток. Для расчета элементов системы водоснабжения устанавливают пределы возможных колебаний расхода воды в отдельные часы суток. Расчет параметров водопроводных сооружений производят на максимальный часовой расход воды в дни максимального водопотребления, который определяется по формуле

$$Q_{сут}^{макс} = K q_{м.к.с.сут} M / 24,$$

где  $K$  — коэффициент часовой неравномерности, показывающий во сколько раз максимальный часовой расход превышает средний.

Неравномерность водопотребления в населенных местах зависит от численности населения и степени их благоустройства. Так, в больших городах неравномерность водопотребления меньше, чем в городах с небольшим населением. Это объясняется тем, что, с увеличением численности потребителей сглаживаются колебания водопотребления, и разница между максимальным и средним водопотреблением уменьшается. Характер колебаний водопотребления по часам суток в зависимости от величины среднесуточного расхода воды  $Q_{сут}^{ср}$  виден из данных табл. 5. Неравномерность водопотребления выражают графиками, на которых по оси абсцисс откладывают время в часах, а по оси ординат — расходы воды в процентах от полного суточного расхода. Средний часовой расход воды применительно к графикам водопотребления равен 4,17 % (определяют делением 100 % на 24 ч суток).

При расчете режимов работы систем водоснабжения (насосно-силового оборудования, запасных и регулирующих емкостей, водопроводной сети и т. п.) по графикам водопотребления для каждой категории потребителей, получающих воду из водопровода, строят суммарный график водопотребления и находят часовые (секундные) расходы воды в целом и по отдельным группам потребителей.

Подача полного расчетного расхода воды для тушения пожара должна быть обеспечена при наибольшем часовом расходе воды на другие нужды. При этом расходы воды на поливку территории, прием душей, мытье полов в производственных зданиях и мойку технологического оборудования не учитывают

Таблица 5. Водопотребление по часам суток

Часы суток	Расчет в л/с, % для среднего суточного расхода воды $Q_{ср}$ , л/с, р/в								
	15	30	50	100	200	300	500	800	1200 и более
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0—1	1,2	1,25	1,25	1,55	1,65	1,85	2	2,25	2,6
1—2	1,2	1,25	1,25	1,55	1,65	1,85	2	2,25	2,6
2—3	1,2	1,25	1,25	1,55	1,65	1,85	2	2,25	2,6
3—4	1,2	1,25	1,25	1,55	1,65	1,85	2	2,5	2,6
4—5	1,2	1,25	1,5	1,55	1,65	1,85	2	2,5	2,6
5—6	3,1	3,3	3,55	4,35	4,2	4,8	5,05	4,9	4,8
6—7	4,8	5	5,2	5,95	5,8	5	5,15	4,9	4,8
7—8	7,4	7,2	7	5,8	5,8	5	5,15	5	4,8
8—9	7,95	7,5	7,1	6,7	5,85	5,65	5,2	5	4,8
9—10	7,95	7,5	7,1	6,7	5,85	5,65	5,2	5	4,8
10—11	7,95	7,5	7,1	6,7	5,85	5,65	5,2	5	4,8
11—12	6,3	6,4	6,5	4,8	5,05	5,25	5,1	5	4,8
12—13	3,6	3,7	3,8	3,95	4,2	5	5	4,7	4,7
13—14	3,6	3,7	3,8	3,55	5,8	5,25	5,1	5	4,8
14—15	3,8	4	4,2	6,05	5,8	5,65	5,2	5	4,8
15—16	5,6	5,7	5,8	6,05	5,8	5,65	5,2	5	4,8
16—17	6,2	6,3	6,4	5,6	5,8	5,65	5,2	5	4,8
17—18	6,2	6,3	6,4	5,6	5,75	4,85	5,15	5	4,7
18—19	6,2	6,3	6,4	4,3	5,2	4,85	5,1	5	4,8
19—20	5,25	5,25	5,3	4,35	4,75	4,85	5,1	5	4,8
20—21	3,4	3,4	3,4	4,35	4,1	4,85	5,1	5	4,8
21—22	2,2	2,2	2,2	2,35	2,85	3,45	3,8	4,5	4,8
22—23	1,25	1,25	1,25	1,55	1,65	1,85	2	2,4	3
23—24	1,25	1,25	1,25	1,55	1,65	1,85	2	2,25	2,6
Итого	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Колебания водопотребления по часам суток на промышленном предприятии зависят от вида производственных потребителей воды, времени обеденных перерывов и окончания работы смен. Коэффициенты часовой неравномерности водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды в «холодных» цехах производственных предприятий следующие:

Часы работы

смены . . . . .	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	6—7	7—8
Коэффициенты неравномерности . . . . .	0,5	1	1,5	0,5	1	1	3

На промышленных предприятиях воду расходуют для охлаждения производственной аппаратуры; промывки сырья, полуфабрикатов и готовой продукции; промывки аппаратуры; для питания котлов; для гидротранспорта; гидроочистки и т. п. Неравномерность водопотребления в производственных предприятиях устанавливается соответствующими технологическими расчетами.

## **Глава 2. СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И РЕЖИМ ИХ РАБОТЫ**

Система водоснабжения представляет собой комплекс водопроводных сооружений и устройств, осуществляющих получение воды из природных источников, очистку (в случае необходимости), транспортирование, хранение запасов воды и подачу потребителям.

### **1. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Классификация систем водоснабжения зависит от вида обслуживаемого объекта, числа выполняемых функций, условий приведения в работу, а также способов создания напора воды в водопроводной сети.

По виду обслуживаемого объекта системы водоснабжения подразделяют на городские (коммунальные), производственные, сельскохозяйственные и т. п. По числу выполняемых функций системы водоснабжения бывают многофункциональные (обеспечивающие одновременно подачу воды для выполнения нескольких определенных задач), и специального назначения (предназначенные для подачи воды для выполнения только одной определенной задачи). В зависимости от условий приведения в работу системы классифицируют на автоматизированные системы водоснабжения и системы, приводимые в действие операторами (например, прибывшими к месту пожаротушения подразделениями пожарной охраны). По способу создания напора воды в водопроводной сети системы водоснабжения бывают: постоянного высокого давления; высокого давления, создаваемого при тушении пожара; низкого давления в водопроводной сети.

## Многофункциональные системы водоснабжения

Многофункциональные системы водоснабжения сооружают для выполнения нескольких задач водообеспечения потребителей города или крупного населенного места. Например, системы коммунального водоснабжения обеспечивают водой питьевые, хозяйственные и бытовые нужды населения, снабжают водой небольшие промышленные предприятия, расположенные в черте города, являются источником отбора воды при наружном и внутреннем пожаротушении зданий и сооружений. Основные потребители воды, пользующиеся этими системами, распределяются в зависимости от объема потребляемой воды следующим образом, %: хозяйственно-питьевые нужды населения<sup>1</sup>, нужды административно-общественных зданий — 17, промышленные нужды — 16, пожарные — 3, городские нужды (поливка улиц, питание фонтанов и др) — 1, прочие — 5. Отбор воды на пожарные нужды из таких систем в течение года невелик и составляет незначительную часть общего водопотребления, но во время пожара расход воды на пожарные нужды становится решающим (в большинстве населенных мест, за исключением многочисленных) при расчете бесперебойности водообеспечения потребителей.

В настоящее время на крупных промышленных комплексах пожароопасных производств широко распространены многофункциональные системы противопожарного водоснабжения. Например, многофункциональная система противопожарного водоснабжения нефтеперерабатывающего завода подает воду на нужды наружного пожаротушения (отбор воды) из установленных на водопроводной сети пожарных гидрантов прибывшими к месту пожара подразделениями пожарной охраны; во внутренний противопожарный водопровод зданий и сооружений, используемый в качестве первичных средств пожаротушения от установленных внутри помещения пожарных кранов; в стационарные и автоматические установки пожаротушения, а также другое пожарное оборудование, предназначенное для тушения пожаров, водоорошения, водоохлаждения и создания

---

<sup>1</sup> Потребление воды для приготовления пищи и мытья — 30, для стирки — 10, для пользования ваннами — 30 и для работы смывных бачков канализации — 30 %.

пожаробезопасных условий эксплуатации технологического оборудования производства.

В настоящее время в городах и промышленных предприятиях построено более 11 тыс. многофункциональных систем водоснабжения. Наряду с этим опережающими темпами ведется строительство автоматизированных систем противопожарного водоснабжения. Внедрение в практику современного строительства таких систем способствует развитию высокопроизводительных машин и автоматизированных линий, позволяет совершенствовать объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и сооружений пожароопасных производств. Темпы внедрения автоматизированных систем противопожарного водоснабжения особенно высоки на объектах с большой концентрацией материальных ценностей (базах, складах и т. п.), предприятиях с пожаровзрывоопасными производствами. Ниже приведены данные по оснащению объектов народного хозяйства автоматизированными системами пожаротушения:

Годы	. . . . .	1972	1974	1976	1978	1980	1982	1984
Число	систем, тыс.	28,7	40	50,2	76	82	97	106

Автоматизированные системы противопожарного водоснабжения в зависимости от функционального назначения подразделяют на три группы:

тушения (для ликвидации пожара в результате воздействия воды или создания условий, прекращающих процесс горения);

локализации (для сдерживания развития пожара с момента его возникновения до прибытия подразделений пожарной охраны и аварийно-спасательных служб);

блокирования (для предохранения объекта от опасного воздействия факторов пожара — теплового излучения или высоких температур, например, при защите людей, находящихся в зоне повышенной тепловой радиации; технологических аппаратов, содержащих легко воспламеняющиеся жидкости и горючие газы, или для защиты строительных конструкций с низкой огнестойкостью и др.).

Ниже дана классификация многофункциональных систем водоснабжения по различным признакам:

по видам потребителей — системы хозяйственно-питьевого водоснабжения, в том числе и противопожар-



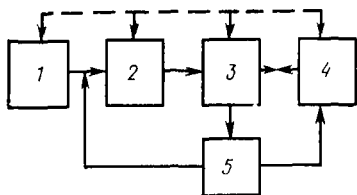


Рис 2 Принципиальная схема системы водоснабжения  
 1 - водосточник с сооружениями водозабора, 2 — водопитатель с сооружениями водоочистки, 3 — сооружения подачи и распределения воды с запасными и регулируемыми емкостями 4 — оборудование контроля и автоматического управления процессами водоснабжения 5 — водоразборные устройства

ного; системы производственно-противопожарного водоснабжения;

по охвату снабжаемых объектов — системы водоснабжения одного объекта; групповые системы водоснабжения, охватывающие группу объектов, разнородные объекты на территории района;

по кратности использования подаваемой воды — системы прямоточные: с оборотом воды; с последовательным использованием воды на различных установках

Устройство каждой из перечисленных систем водоснабжения может быть различным, но структурная схема любой из них должна содержать: водосточник с сооружениями очистки воды, водопитатель, сооружения подачи и распределения воды с запасными и регулирующими емкостями, оборудование контроля параметров и автоматического управления процессами водоснабжения, водоразборные устройства (рис. 2).

Водозаборные сооружения предназначены для забора воды из источника питания (реки, озера, подземного источника) с целью использования ее для нужд водоснабжения

Сооружения водоочистки определяют комплекс технологического оборудования для доведения качества воды, поступающей в водопроводную сеть из источника водоснабжения, до установленных нормативных показателей.

Сооружения подачи и распределения воды объединяют водопроводную сеть, представляющую совокупность водопроводных линий (трубопроводов) для подачи воды к месту потребления, и расположенные на ней насосные и емкости для хранения и регулирования подачи воды.

Оборудование контроля и автоматического управления процессами водоснабжения представляет собой комплекс измерительной и управ-

ляющей аппаратуры, в которой обрабатывается информация, формируются команды для управления водопроводными сооружениями без участия человека.

## 2 СХЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Система водоснабжения охватывает следующие элементы:

водозаборные сооружения, осуществляющие забор воды из природных источников;

насосные станции (водоподъемные сооружения), создающие требуемые давления в водопроводных трубах для подачи расходов воды;

сооружения для очистки и обработки воды (очистные сооружения), улучшающие качество (очистку) природной воды в соответствии с требованиями потребителя;

водоводы и водопроводные сети, транспортирующие воду к местам потребления;

регулирующие и запасные емкости -- резервуары для хранения и аккумуляции воды

Схема расположения водопроводных сооружений системы водоснабжения города при использовании природного источника воды показана на рис. 3. Если очистные сооружения и резервуар чистой воды расположены на достаточно высоких отметках местности, очищенная вода может подаваться объекту по водоводам самотеком, без устройства водопитателя. Иногда целесообразно приблизить очистные сооружения с резервуаром чистой воды и водопитатель к объекту водоснабжения.

Если качество воды природного источника позволяет использовать воду без очистки, потребность в устройстве очистных сооружений отпадает. Например, без очистки используют воду поверхностных водоемов предприятий ряда отраслей промышленности.

Напорная регулирующая емкость (водонапорная башня или резервуар на высокой местности) размещается на территории объекта, причем место ее расположения определяется в зависимости от планировки объекта и рельефа местности.

Рассмотренные варианты схем относятся к водопроводам населенных пунктов и промышленных предприятий.

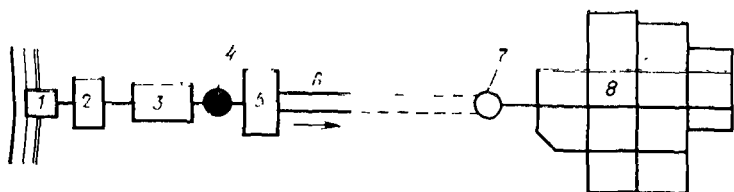


Рис. 3. Схема расположения водопроводных сооружений  
 1 — водоисточник с водозаборными сооружениями; 2; 3 — сооружения водоочистки с насосной первого подъема воды; 4 — емкости для хранения «чистой» воды, 5 — водопитатель (насосная второго подъема воды), 6 — водоводы, 7 — водонапорная башня; 8 — водопроводная сеть

тий. Существуют системы водоснабжения специально для промышленных объектов. К ним относятся системы оборотного водоснабжения, где вода после использования ее для технических целей не загрязняется и нагревается при охлаждении производственных агрегатов. При недостаточном дебите источника или большой стоимости подачи из него требуемого количества воды (например, при удаленности источника) экономически целесообразно сбрасываемую предприятием воду охлаждать и подавать снова для использования. При этом из источника добавляется некоторое количество воды для восполнения потерь при обороте и охлаждении. Охлаждают воду в прудах, брызгальных бассейнах и градирнях.

Когда воду, сбрасываемую одним промышленным потребителем, использует другой потребитель, устраивают систему повторного (последовательного) использования воды. Такая система также позволяет снизить количество забираемой из источника воды. В зависимости от назначения объекта и требований, предъявляемых потребителями к качеству воды, а также экономических соображений предусматривают единую систему водоснабжения для всех целей — единый многоцелевой водопровод. Для отдельных (основных) категорий водопотребления устраивают самостоятельные водопроводы.

В городах обычно сооружают хозяйственно-противопожарный водопровод. Этот же водопровод подает воду для хозяйственно-питьевых нужд промышленных предприятий, расположенных в городе, и для технических нужд предприятий, для которых требуется вода

питьевого качества. Для промышленных предприятий города, которые являются крупными потребителями воды и могут использовать неочищенную или малоочищенную воду, устраивают самостоятельные производственные водопроводы.

Особо учитываются потребители воды крупных промышленных предприятий, расположенных вне городской территории. При проектировании водопровода для такого предприятия учитывают расходы воды на производственные нужды предприятия, хозяйственно-питьевые нужды рабочих во время их пребывания на производстве, в том числе на прием ими душа, поливку заводских проездов и зеленых насаждений и для тушения пожара. Обычно при заводе имеется рабочий поселок, для которого дополнительно предусматривается подача воды на хозяйственно-питьевые нужды населения и на тушение пожара в поселке.

На промышленном предприятии устраивают как объединенные, так и отдельные системы для подачи воды на производственные и хозяйственно-питьевые нужды. Единую систему подачи и распределения воды на хозяйственно-питьевые и производственные нужды сооружают в тех случаях, когда требования к качеству воды производства мало отличаются от требований к питьевой воде (например, на предприятиях пищевой промышленности). Обычно на территории промышленного предприятия предусматривают отдельные системы водоснабжения для производственного и хозяйственно-питьевого водопотребления, подающие воду с разной степенью очистки. Иногда система производственного водоснабжения значительно усложняется тем, что отдельные потребители предприятия предъявляют различные требования к качеству воды. Это вызывает необходимость в возведении нескольких систем водоснабжения на предприятии. Иногда сооружение нескольких отдельных систем производственного водоснабжения обуславливается тем, что для отдельных цехов требуется неодинаковое давление в сетях. Строительство водопроводных сетей с разными напорами позволяет сократить расход энергии на подачу воды. Вопросы объединения противопожарного водопровода с хозяйственно-питьевым или производственным водопроводом решают на основе технико-экономических расчетов.

## Водопроводы для наружного пожаротушения

Схемы водопроводов выполняют в зависимости от характера водопровода, который должен обслуживать пожарные нужды, и его назначения.

По способу создания напоров противопожарные водопроводы бывают:

постоянного высокого давления;

высокого давления, повышаемого только во время пожара. В этом случае давление в водопроводной сети достаточно для непосредственной подачи воды для тушения пожаров от гидрантов, установленных на сети (без помощи привозных насосов);

низкого давления (подача воды для тушения от привозных насосов).

Противопожарный водопровод постоянного высокого давления устраивают редко вследствие больших материальных затрат на создание водопроводной сети, обслуживающей только пожарные нужды, и необходимости устройства высокой водонапорной башни или отдельной пневматической установки.

Противопожарный водопровод высокого давления, повышаемого только во время пожара, устраивают главным образом на пилебумажных комбинатах, крупных нефтеперерабатывающих комплексах и других промышленных объектах, характеризующихся высокой пожарной опасностью. Противопожарный водопровод высокого давления, повышаемого во время пожара, объединяется с хозяйственно-питьевым водопроводом промышленных предприятий. Напор для пожаротушения увеличивается только в хозяйственно-питьевой сети, в промышленном водопроводе напор в это время остается без изменения, поэтому при пожаре не нарушаются производственные процессы, требующие наличия постоянного давления в сети.

Строительство противопожарных водопроводов, объединенных с хозяйственно-питьевыми, целесообразно также потому, что хозяйственная сеть, как правило, является более разветвленной, чем производственная, и охватывает наибольшую часть территории объекта. При таких водопроводах наружное пожаротушение может производиться непосредственно от гидрантов без привозных насосов, а внутреннее противопожарное водоснабжение обеспечивается устройством в здании по

жарных стояков с пожарными кранами. При этом водонапорную башню устраивают высотой, достаточной для самотечной подачи воды для тушения пожара от внутренних пожарных кранов (в начальной стадии пожара). Бак водонапорной башни во время пожара после пуска пожарного насоса выключается с помощью автоматического приспособления, так как напор, развиваемый пожарным насосом, превышает высоту водонапорного бака.

Противопожарный водопровод высокого давления, объединенный с производственным водопроводом, устраивают в редких случаях, когда при пожаре приходится подавать под высоким давлением все количество воды, необходимой для производственных нужд (как правило, это количество бывает значительным).

Противопожарный водопровод низкого давления, объединенный с хозяйственно-питьевым водопроводом, рассчитывают таким образом, что во время пожара увеличивается только количество подаваемой воды, напор же в сети поддерживается не ниже 10 м. При водопроводах низкого давления выключать водонапорную башню или контррезервуар во время пожара не требуется. Такие водопроводы широко распространены в городах и поселках, где других сетей, кроме хозяйственных, не бывает. Отбор воды для тушения пожаров из таких водопроводов производят с помощью привозных пожарных насосов (автонасосов, мотопомп и др.).

Противопожарный водопровод низкого давления, объединенный с производственным водопроводом, устраивают на производствах, где пожарный расход, по сравнению с производственным, невелик и не влияет на напор производственного водопровода. Однако если для пожарных нужд необходим пуск добавочного насоса, возможно понижение напора в сети, что не всегда допускается требованиями технологии. При рассматриваемой схеме водопровода отбор воды на наружное пожаротушение производится от сети объединенного производственно-противопожарного водопровода низкого давления, а внутреннее пожаротушение — от внутренних хозяйственно-производственных водопроводов. Такая схема рациональна, потому что внутренняя сеть в этом случае подает воду как на хозяйственно-питьевые нужды, так и нужды внутреннего пожаротушения.

Противопожарный водопровод объединяют иногда одновременно с хозяйственно-питьевым и производственным водопроводами. В этом случае водопроводная сеть получается единой, и водопроводы могут быть высокого и низкого давления.

Приведенные схемы противопожарных водопроводов применяют в разнообразных комбинациях. Выбор той или иной схемы зависит от характера производства, занимаемой им территории, характеристики пожарной опасности производства, дебита источников водоснабжения и технико-экономических показателей, а также местных условий рассматриваемого объекта. При больших производственных расходах воды более рациональной в ряде случаев оказывается схема противопожарного водопровода высокого давления, объединенного с хозяйственно-питьевым водопроводом. Если для объекта допустим пожарный водопровод низкого давления, то он может быть объединен с производственным при условии достаточного охвата водопроводной сетью зданий и сооружений на территории объекта. На выбор схемы водопровода оказывают влияние характеристики внутреннего противопожарного водопровода, спринклерно-дренчерного оборудования, а также стационарных установок пожаротушения. Кроме того, при выборе противопожарного водопровода необходимо учитывать, имеется ли на объекте или вблизи него пожарная команда.

Водопроводы низкого давления можно сооружать лишь при наличии на объекте или в непосредственной близости от него пожарных команд с передвижными пожарными насосами. Водопроводы высокого давления целесообразно устраивать при отсутствии пожарной команды или при недостатке передвижных пожарных насосов для подачи на тушение пожара полного расчетного количества воды (например, на отдаленных от населенных пунктов объектах). При выборе схемы водоснабжения необходимо учитывать технико-экономические показатели варианта технического решения, включающие капитальные вложения и издержки эксплуатации системы водоснабжения. В табл. 6 даны характеристики противопожарных водопроводов, отражающие преимущества и недостатки вариантов при выборе рациональной схемы.

Таблица 6 Преимущества и недостатки вариантов схем противопожарного водопровода

1 Схема водопровода	2 Преимущества	3 Недостатки	4 Цели использования
Специальный противопожарный постоянный высокого давления	Постоянная готовность к подаче воды под необходимым для тушения пожара напором	Низкие показатели экономичности сети водонапорной башни	При благоприятных топографических условиях, для особо опасных в пожарном отношении и важных объектов
Специальный противопожарный высокого давления, создаваемого во время пожара	Возможность подачи воды для тушения пожара непосредственно от гидрантов	Увеличение капитальных затрат отдельной сети трубопроводов сравнительно с объединенными водопроводами	На складах с горючими и легковоспламеняющимися материалами
Высокого давления, объединенный с производственным водопроводом	Возможность быстрой подачи воды к месту пожара без применения привозных насосов	Зависимость от культуры обслуживания системы. Возможность использования для тушения пожара воды, необходимой для производственных нужд	При небольших производственных расходах воды, если повышение напора во время пожара не нарушает технологические процессы
Низкого давления, объединенный с производственным водопроводом	Малая зависимость от качества технического обслуживания системы водоснабжения. Отсутствие необходимости выключения водонапорной башни	Отсутствие возможности подачи воды для пожаротушения непосредственно из гидрантов без привозных насосов	При разветвленной водопроводной сети производственного водопровода



Схема водопровода	Преимущества	Недостатки	Целесообразность применения
I	2	3	4
Высокого давления, объединенный с хозяйственно-питьевым водопроводом	Исключенные вероятности сбоя подачи воды на производственные нужды во время пожара	Сложное техническое обслуживание системы. Необходимость увеличения диаметров труб хозяйственно-питьевой сети	При повышении напора, не нарушающего технологические процессы производства. При развитой хозяйственно-питьевой сети
Низкого давления, объединенный с хозяйственно-питьевым водопроводом	Возможность укладки сети облегченных труб. Удобство эксплуатации и технического обслуживания	Отсутствие возможности подачи воды для пожаротушения непосредственно от пожарного гидранта	В населенных местах при наличии вблизи пожарного депо
Высокого давления, объединенный с производственным и хозяйственно-питьевым водопроводом	Возможность подачи воды непосредственно от гидрантов без привозных насосов. Небольшие капитальные вложения на строительство сети	Сложная и дорогостоящая эксплуатация. Возможность использования воды, предназначенной для тушения пожара, на другие нужды	На предприятиях с большими производственными расходами воды. При возможности использования питьевой воды для производственных нужд
Низкого давления, объединенный с производственным и хозяйственно-питьевым водопроводом	Незначительные капитальные вложения и издержки эксплуатации	Возможность использования воды, предназначенной для тушения пожара, на другие цели	При возможности использования питьевой воды для производственных нужд

## Внутренний противопожарный водопровод

Внутренний водопровод должен обеспечивать подачу воды для образования струй, необходимых при тушении пожара. Для этого требуются устройство водонапорной башни с определенным запасом воды, непрерывная работа насосов, или устройство пневматического водоснабжения, заменяющего водонапорную башню.

Влияние требований внутреннего противопожарного водопровода на выбор схемы наружного водопровода можно показать на примере. Положим, что противопожарный водопровод можно выполнить по схеме низкого давления и объединить с производственным водопроводом, подающим неочищенную воду (не пригодную для хозяйственно-бытовых нужд). Возникает вопрос к какому водопроводу можно присоединить внутреннюю противопожарную сеть?

В случае объединения внутренней противопожарной сети с производственной необходимо учесть влияние увеличения напора в сети на эксплуатацию наружного производственного водопровода, исходя из условия тушения пожара от внутренних пожарных кранов. Если требуемый напор для производственного водопровода велик, а расход велик и напор для тушения через внутренние краны больше производственного напора, то объединять внутренний противопожарный водопровод с производственным целесообразно.

## Спринклерное и дренчерное оборудование

Спринклерное оборудование предназначено для автоматической подачи сигнала о пожаре и его тушения. Оборудование состоит из труб, проложенных внутри помещения под потолком. На трубах установлены спринклеры, которые автоматически открываются при повышении температуры в помещении до заданного предела и подают в очаг горения воду в виде капельных водяных струй. Спринклерная система постоянно находится под давлением воды, чтобы обеспечить ее подачу к месту пожара при открывании замка спринклера. Водоисточником спринклерного оборудования служит хозяйственно-противопожарный, производственно-противопожарный и другие водопроводы, а также естественные водоисточники и искусственные водоемы. В зависимости от вида водоисточника выбирают тип водопитателя. Обычно спринклерное оборудование имеет два водопитателя: вспомогательный (автоматический) и основной. Автоматический водопитатель (водонапорный бак, гидропневматическая установка, водопровод) подаст воду в установку до момента включе-

ния в работу основного водопитателя. В качестве основного водопитателя используют насосно-силовое оборудование, водопроводы и запасные емкости. Трубопроводы спринклерного оборудования в режиме ожидания заполняют водой или воздухом в зависимости от температуры воздуха в помещении. Распределительные сети спринклерного оборудования подразделяются на самостоятельные секции (обычно секция защищает помещение или этаж здания) с тупиковой или кольцевой разводкой трубопроводов. Капельные водяные струи образуются при выходе воды из спринклера при напоре не менее 5 м.

Дренчерное оборудование предназначено для автоматического или ручного тушения пожара в помещениях путем орошения капельными водяными струями на расчетной площади здания. Дренчерное оборудование используют также для создания водяных завес в проемах дверей или окон, орошения отдельных элементов технологического оборудования и т. п. Такое оборудование применяют для пожароопасных объектов, где возможно быстрое распространение огня. При горении легковоспламеняющихся веществ и жидкостей дренчерное оборудование локализует пожар (сдерживает развитие очага пожара), позволяет пожарным приблизиться к очагу горения и предотвращает возможность распространения огня на соседние объекты. Устройство дренчерного оборудования схоже со спринклерным, только вместо спринклеров на распределительной сети установлены дренчеры (спринклеры без легкоплавкого замка) и автоматическое включение подачи воды осуществляется по команде пожарного извещателя, реагирующего на один из факторов, сопутствующих пожару (теплота, дым, пламя).

Стационарные установки локального действия используют для тушения загораний на отдельных участках технологических установок особо высокой пожарной опасности, когда применение спринклерно-дренчерного оборудования неэффективно. Эффект тушения в данном случае достигается мгновенной подачей большого количества воды в очаг пожара за короткий промежуток времени. Тушение пламени твердых горючих материалов и жидкостей в данном случае достигается в результате подачи распыленных или туманообразных водяных струй. Для образования таких

струй используют специальные оросители, в которые вода подается под высоким давлением (до 1 МПа).

Установки водопенного пожаротушения применяют для тушения пламени легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Наибольшее распространение эти установки получили в системах противопожарной защиты химической, нефтехимической и других отраслях промышленности, где добывают и перерабатывают нефть и природный газ. Огнетушащим средством в таких установках является пена, которая получается из 4—6%-ного водного раствора пенообразователей. Пенные установки имеют спринклерное или дренчерное исполнение. По своему устройству они аналогичны стационарным установкам водяного пожаротушения. Отличие состоит в том, что спринклеры заменены оросителями пены, а дренчеры — генераторами пены. Кроме того, водопитатели пенных установок дополнительно оборудуют дозаторами для введения требуемого количества пенообразователя в поток воды.

### Установки лафетных стволов

Лафетные установки применяют для подачи и управления водяными или пенными струями большой мощности. Для этой цели пожарные лафетные стволы большой производительности (до 100 л/с) устанавливают на специальных вышках, кровле зданий или площадках и подключают к специальному противопожарному водопроводу высокого давления. Лафетные установки предназначены для тушения пожаров в складах лесо-, пиломатериалов, на технологическом оборудовании большой высоты (например, ректификационных и вакуумных колоннах нефтеперерабатывающих заводов), а также складах со сжиженным горючим газом. Для оперативной работы лафетного ствола предусматривается быстросействующая арматура включения и выключения подачи жидкости из водопровода. Лафетные установки бывают с ручным и автоматизированным приводом. Приведенные выше схемы определяют лишь состав и взаимное расположение элементов системы водоснабжения. Размеры отдельных сооружений и установок, число и мощность насосов, вместимость резервуаров, высоту и вместимость водонапорных башен, диаметры труб рассчитывают в зависимости

сти от расхода подаваемой воды и намеченного для них прогнозом режима работы.

Основным фактором, определяющим параметры работы элементов системы водоснабжения, является режим расходования воды потребителями, которых эта система обслуживает. В отличие от многих инженерных систем, рассчитываемых по заранее известным и заданным нагрузкам, системы водоснабжения должны учитывать непрерывно меняющийся режим водообеспечения, поэтому при проектировании систем водоснабжения необходимо точное прогнозирование водопотребления.

Для промышленных предприятий расходы воды на производственные нужды задают в соответствии с технологическим регламентом потребления воды. Сложнее прогнозировать водопотребление в населенных пунктах, так как расходование воды населением определяется рядом факторов, связанных с укладом жизни и трудовой деятельностью людей.

### **3. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

Проектирование систем водоснабжения связано с построением структурной схемы и оценкой параметров входящих в нее элементов. В результате расчета определяют производительность водопитателя, размер диаметров водопроводных сетей, вместимость запасных и регулирующих емкостей и т. п. При этом необходимо установить тип системы, рационально разместить водопроводные сооружения, представить компоновку агрегатов и оборудования, а также решить экономические задачи. В настоящее время проектировщик располагает арсеналом технических решений и должен выбрать из них наилучшие. Задача усложняется необходимостью учета объективно ограниченных ресурсов и потерь неэкономического характера. При этом риск просчета намного уменьшается, если удастся изучить технические и экономические факторы. Техничко-экономический анализ, положенный в основу проектирования систем водоснабжения, в настоящее время является самостоятельным разделом теории обоснования проектных решений. Предметом технико-экономического анализа является сложная техническая система, для которой заданы цели и характеристики функционирования используемые при технико-экономическом анализе

Первый вид задачи, когда заданными являются параметры водообеспечения процесса тушения пожара и тип системы (с конкретными элементами и характеристиками надежности). В этом случае необходимо отыскать по критерию минимума приведенных затрат вариант водоподачи с распределением потоков воды, отвечающих наилучшему процессу технического обслуживания водопроводных сооружений. Решение подобного типа задач основывается на методах теории исследования операций

Второй вид задачи, когда задаются лишь характеристики назначения и надежности водоснабжения и требуется определить тип системы для подачи воды. Из условия задачи видно, что она сложнее первой, так как отличается большей неопределенностью (наряду с режимом подачи и распределения воды неизвестными являются также элементы системы и их характеристики). Для решения этого класса задач применяют методы технико-экономического анализа в сочетании с методами проектирования систем водоснабжения.

В третьей задаче неизвестными являются тип системы и характеристики назначения и надежности. Этот класс задач имеет наибольшую степень неопределенности и требует при решении применения методов теории анализа систем.

### Эффективность варианта технического решения

Основополагающим в технико-экономическом анализе является эффективность решения. В соответствии с ГОСТ 15467—79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения» вариант рассматриваемого решения может быть представлен в виде продукции, которая «рассматривается как материализованный результат процесса трудовой деятельности, обладающий полезными свойствами, полученный в определенном месте за определенный интервал времени и предназначенный для использования потребителями в целях удовлетворения их потребностей»<sup>1</sup> Показатель эффективности согласно ГОСТ 15467—79 это «количественная характеристика степени достижения полезных результатов при исполь-

<sup>1</sup> С 9—27 с

зовании продукции в конкретной эксплуатационной ситуации с учетом эксплуатационных затрат»<sup>1</sup>.

Под эффектом (результатом) понимается полное или частичное достижение определенных технических, экономических и социальных целей. Если система обеспечивает требуемую норму водопотребления, значит достигается техническая цель. В результате модернизации оборудования, позволяющего увеличить интенсивность подачи воды при пожаротушении и, следовательно, уменьшить материальный ущерб от пожара достигается экономическая цель, направленная на снижение потерь по восстановлению объекта. Благодаря оснащению предприятия автоматизированной (быстродействующей) системой противопожарного водоснабжения, обеспечивающей ликвидацию очага загорания в начальной стадии развития пожара и исключаящей гибель людей и катастрофические разрушения оборудования, достигается социологический эффект.

При оценке эффективности системы противопожарного водоснабжения необходимо учитывать капитальные вложения на возведение водопроводных сооружений, издержки эксплуатации и потери, обусловленные ущербами от пожаров, развивающихся в результате недостаточного водообеспечения пожарной техники и оборудования пожаротушения. Система водоснабжения имеет множество сложных свойств, которые проявляются при ее проектировании, строительстве и эксплуатации (техническом обслуживании, ремонтах и использовании). Например, одно из множества свойств системы — надежность характеризуется такими относительно простыми свойствами, как безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтнопригодность.

Свойства системы количественно характеризуются параметрами, совокупность которых представляет комплексный показатель качества функционирования. Многие показатели качества функционирования системы являются функциями ее параметров.

Свойства системы противопожарного водоснабжения в соответствии с определенным качеством<sup>2</sup> подразделя-

<sup>1</sup> С. 7—27 с.

<sup>2</sup> Качество — совокупность свойств продукции, обуславливающих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением продукции.

ются на технологические (характеризующие систему как комплекс взаимосвязанных водопроводных сооружений), потребительские (характеризующие принадлежность системы к определенному классу потребителей), экономические (характеризующие экономичность) и эксплуатационные (характеризующие систему как объект эксплуатации).

К первой группе относятся многофункциональные системы водоснабжения городов, полезный эффект которых оценивается экономическими и социологическими показателями в виде дохода от оказываемой городу помощи в реализации программы пожарной безопасности населения.

Ко второй группе относятся системы, полезный эффект которых проявляется в потенциальной форме. Эту группу составляют автоматизированные системы специального противопожарного водоснабжения. Основное их назначение — постоянная готовность к автоматическому тушению пожара, хотя потребность в этом может и не возникнуть в течение всего срока службы этой системы.

К третьей группе относятся системы противопожарного водоснабжения промышленных объектов, полезный эффект которых проявляется за счет сокращения вынужденных простоев предприятия в результате обеспечения своевременного тушения пожаров и таким образом предотвращающих крупные аварии технологических линий.

При проектировании системы водоснабжения используют количественные методы оптимизации параметров, смысл которой заключается в установлении таких значений этих параметров и такого изменения их во времени, при которых достигается максимально возможная в определенных условиях эксплуатации системы водоснабжения эффективность.

Математическая модель оптимизации состоит из целевой функции и ограничений. Целевая функция, представляющая собой максимум эффекта на единицу затрат, равняется:

$$Ц = Э/З,$$

где Э — эффект (результат) З — затраты

При  $Э = \text{const}$   $Ц = З \rightarrow \min$ , при  $З = \text{const}$   $Ц = Э \rightarrow \max$ . Из этого следует, что для оптимизации параметров необходимо количественно оценить: характери-



стики системы; эффект от эксплуатации; затраты на разработку, строительство и эксплуатацию; потери от ненадежности функционирования.

На практике используются три вида оценки эффекта и затрат:

техническая — в виде технических единиц измерения (мощность, производительность, расход, вместимость и т. п.);

денежная — в виде денежных единиц;

полезностная — в виде условных единиц (баллы, коэффициенты весомости, индексы, шкалы полезности и т. п.).

Ограничениями в расчетной модели являются условия проектирования, строительства и эксплуатации системы, характеризующиеся научно-техническими, технологическими и эксплуатационными возможностями, требованиями пожарной безопасности, мероприятиями по охране окружающей среды и т. п.

Основным требованием к работе систем водообеспечения различных объектов является выполнение ими заданных функций при высоких показателях надежности и экономичности. Иначе говоря, система должна не только выполнять с наименьшими затратами средств заданные функции водоснабжения, но и фактически выполнять их в процессе эксплуатации без нарушений.

При определении эффективности проектируемых систем противопожарного водоснабжения, как правило, используют аппроксимационные модели. Их построение основано на применении специальных разделов теории вероятностей и математической статистики. Эти модели разрабатывают в предположении, что процесс эксплуатации определяется внешними причинами и зависит от так называемого внутреннего состояния самой системы. Противопожарное водоснабжение представляет собой сложную систему<sup>1</sup>, состоящую из нескольких функционально самостоятельных подсистем, десятков агрегатов, сотен узлов и элементов. В каждом элементе заложено

---

<sup>1</sup> Сложной системой называют совокупность взаимосвязанных элементов<sup>2</sup>, обеспечивающих выполнение заданных функций несколькими различными способами и отличающихся уровнями качества функционирования.

<sup>2</sup> Элемент системы — часть системы, выполняющая определенные функции и не подлежащая дальнейшему расчленению на части при данной степени подробности рассматриваемой системы (детали, узлы, агрегаты, машины, простые системы).

на потенциальная возможность отказа, приводящая в конечном счете к снижению надежности системы в целом. Это в значительной мере обуславливает процесс эксплуатации системы и ожидаемый уровень качества ее функционирования.

Простая система представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов, обеспечивающих выполнение заданных функций с одним определенным уровнем качества функционирования.

Как видно из определения, систему можно отнести к сложной или простой в зависимости от требуемой цели и постановки решения задачи. При моделировании последовательно обобщают информацию, исходя из структуры отдельных частей моделей (элементов), последовательно укрупняемых в более общие. Например, в качестве частных могут рассматриваться модели определения продолжительности подачи воды, емкости водоисточника инерционности системы контроля и автоматики и т. п. Расчеты по таким моделям независимы один от другого и основаны на использовании соответствующей исходной информации. Результаты расчета выражают в виде таких усредненных показателей, как условные математические ожидания величин и вероятности рассматриваемых событий<sup>1</sup>.

Для анализа качества функционирования систем в настоящее время применяют модели, основанные на принципах теории случайных или марковских<sup>2</sup> процессов. Самостоятельным разделом теории марковских процессов является теория массового обслуживания. Под обслуживанием понимают удовлетворение некоторой системой поступающих в нее требований (заявок). Например, такой системой является противопожарное водоснабжение (обслуживающая система), а заявки на ее использование представляют требования на отбор воды для тушения пожаров, которые выражаются в виде временной последовательности (входящего потока). Этот раздел прикладной математики наиболее перспективен при построении моделей функционирования (по-

<sup>1</sup> Определяемые при условии, что предшествующие им зависящие события произошли (например, математическое ожидание расхода воды для тушения пожара при условии, что система обеспечит требуемую продолжительность подачи).

<sup>2</sup> Случайный процесс, поведение которого после любого момента времени зависит только от его состояния в этот момент и не зависит от поведения процесса в предшествующий период.

лезного эффекта) элементов системы. Особенность задач теории массового обслуживания — случайный характер изучаемых явлений: длительность обслуживания и интервалов между поступающими требованиями. Ряд моделей, построенных на основе применения аппарата теории массового обслуживания, описан в соответствующих разделах настоящей книги.

Для примера рассмотрим структуру сложной многофункциональной системы водоснабжения, в которую входят водоисточник, водопитатель, система распределения, система управления водоподачи и водоразборные устройства для отбора и подачи воды на противопожарные нужды. Работа системы противопожарного водоснабжения характеризуется случайными процессами, связанными с переходами этой системы из одного состояния в другие: подача заданного расхода воды при тушении пожара в течение определенного времени, а затем восстановление израсходованного запаса воды и приведение системы в состояние готовности и ожидания перед очередным включением. Работу системы водоснабжения при тушении пожара характеризуют следующие показатели: потребность в воде (расход); продолжительность отбора воды; частота отбора; одновременное число отборов  $m$ ; неравномерность частоты отборов и характера водонотребления. Система водоснабжения состоит из большого числа элементов, каждый из которых (водопроводные сети, водоприемные сооружения, станции очистки воды, насосные станции и др.) может быть как расчетным элементом, так и сложной системой. Например, если рассматривать систему противопожарного водоснабжения с точки зрения интенсивности подачи воды для тушения пожаров, пропускной способности водопитателей и распределительной системы, а также оптимального регулирования водоподачи и распределения воды при возникновении пожара, то элементами системы будут водоисточник, водопитатель, а также системы распределения воды и управления ее подачей. В этом случае сложную систему рассматривают с точки зрения качества обеспечения подачи воды на противопожарные нужды. Здесь возникают вопросы предварительного создания необходимых запасов воды в водоисточнике, обеспечивающем нормальную работу водопитателя и системы распределения воды, а также проблемы, связанные с нормальным и свое-

временным управлением большим числом взаимосвязанных и взаимодействующих элементов системы.

Число комбинаций состояний, в которых может находиться рассматриваемый расчетный элемент, характеризует переход системы из рабочих состояний в состоянии отказа. Для расчета системы, состоящей из  $n$  элементов, необходимо рассмотреть  $n(n-1)$  возможных связей между ее элементами. Решение задачи для системы с большим числом элементов очень громоздко. В связи с этим важно сократить число рассматриваемых элементов до минимума, объединяя ряд элементов в подсистему. Расчленение системы на элементы является первоочередной задачей при построении расчетной модели для формального описания системы.

Поведение и свойства сложных систем оценивают количественными показателями, которые получают экспериментально (если это возможно) или расчетом. Каждый показатель зависит от процесса функционирования и дает представление об одном из свойств системы. Обычно для этой цели используют комплексный показатель качества функционирования, который представляет собой количественную оценку степени пригодности системы к выполнению поставленной перед ней задачи. Показатель эффективности представляет собой отношение численного значения показателя качества функционирования к приведенным затратам на строительство, эксплуатацию системы. Такой показатель позволяет согласовать разнородные цели и стимулирует оптимальное использование ассигнований на систему противопожарного водоснабжения. Комплексный показатель эффективности  $\Phi$  выражают в виде функциональной зависимости

$$\Phi = \Phi \left( \sum_{i=1}^k \alpha_i, \sum_{j=1}^m \beta_j, \sum_{l=1}^p \gamma_l \right),$$

где  $\alpha_i$  — параметры  $i$  го элемента системы,  $\beta_j$  — параметр  $j$  той составляющей характеристики внешней среды,  $\gamma_l$  — параметр  $l$  го элемента приведенных затрат

Значения показателей эффективности — это действительные числа, поэтому множество процессов функционирования, заключенных внутри некоторого интервала можно представить в виде отображения множества действительных чисел. Показатель эффективности (в

пределах изменения значений этого показателя) выражается функционалом от процесса функционирования.

Показатель качества функционирования многофункциональной системы водоснабжения зачастую представляют в виде общего количества воды в сутки, параметром распределения ее между потребителями по часам суток. В результате устанавливают, сможет ли система обеспечить потребителей водой в течение установленного срока. Нормы проектирования водоснабжения при этом рекомендуют простой прием, в основу которого положены требования «подачи полного расчетного расхода на тушение пожара» при «наибольшем часовом расходе воды на другие нужды». Подобный прием при всей кажущейся очевидности использования вероятностного решения задачи принят волевым порядком. Этот этап расчета является очень важным, поскольку именно здесь решается вопрос о качестве функционирования и экономичности системы. Таким образом, для суждения о качестве функционирования важно знать слагаемые показателя качества функционирования проектируемой системы водоснабжения и учитывать влияние случайных факторов на процесс отбора воды.

## **Характеристика качества функционирования системы противопожарного водоснабжения**

Качество функционирования системы противопожарного водоснабжения оценивают количественной характеристикой, охватывающей наиболее важные свойства системы в конкретной эксплуатационной ситуации. Число слагаемых, определяющих эту характеристику, зависит от имеющейся информации при разработке новой системы водоснабжения, сложности компоновки структуры и уровня совершенства оборудования, используемого в водопроводных сооружениях. Характеристика для оценки качества функционирования системы должна как можно полнее отражать свойства назначения системы, надежности ее работы, технологичности сооружения и т. п. Каждое из указанных свойств может объединять несколько различных свойств качества системы. Например, показатель назначения системы противопожарного водоснабжения характеризует одно из

важнейших ее свойств — удовлетворять потребителя водой требуемого качества, в определенных количествах и по строго регламентированному режиму подачи. Такая характеристика может выражаться, например, вероятностью обеспечения требуемого качества воды, производительностью водопитателя ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), продолжительностью включения подачи заданного количества воды для тушения пожара (с), объемом запаса воды для пожаротушения ( $\text{м}^3$ ). При анализе эффективности системы часто используют безразмерные единицы. Показатель надежности водоснабжения характеризуется безотказностью, ремонтнопригодностью, сохраняемостью и долговечностью. Эти свойства характеризуют надежность, от которой зависит выполнение возложенных на систему задач, а следовательно, общая оценка характеристики качества функционирования.

Показатель назначения характеризует технологические свойства системы и определяет ее основные функции, для которых она предназначена, отражает область и условия применения. Единичный показатель назначения характеризует свойства системы, структурную схему и устройство системы водоснабжения.

Параметры, характеризующие показатель назначения многофункциональной системы коммунального водоснабжения для пожарных целей, приведены ниже:

отношение расчетного расхода воды, потребляемой для пожарных целей, к суммарному расчетному расходу воды на хозяйственные, питьевые, производственные и другие нужды;

продолжительность водообеспечения расчетного расхода воды для работы пожарной техники;

возможная водоотдача системы на пожарные нужды при среднесуточном уровне водообеспечения других потребителей;

возможная продолжительность водообеспечения расчетного расхода воды для работы пожарной техники при среднесуточном уровне водообеспечения других потребителей.

Каждый параметр характеризует совокупность нескольких простых свойств, причем каждый параметр может иметь различные единицы измерения и по своему вносить вклад в оценку комплексного показателя назначения системы. Для наглядности оценки таких

свойств можно пользоваться средневзвешенным показателем  $K_0$ , определяемым по формуле

$$K_0 = \sum_{i=1}^n K_i \alpha_i,$$

где  $K_i$  — параметр, характеризующий  $i$ -е свойство системы  $\alpha_i$  — коэффициент весомости  $i$ -го параметра выражаемый в долях единицы, причем

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

Классификационным показателем оценивают принадлежность рассматриваемой системы водоснабжения по заранее определенной классификационной группировке. На основании этого показателя выбирают аналог или базовый вариант технического решения системы.

Функциональный показатель (технической эффективности) оценивает полезный эффект, создаваемый системой в результате ее эксплуатации. Этот показатель характеризуется вероятностью выполнения поставленных перед системой противопожарного водоснабжения задач (например, вероятностью водообеспечения потребителя), размером сокращения ущерба от пожаров в результате повышения уровня надежности водообеспечения при модернизации системы противопожарного водоснабжения и др. Чаще всего полезный эффект объединяет ряд слагаемых, которые определяют технические параметры системы противопожарного водоснабжения, входящих в обобщенный показатель  $K_0$ . Показатель  $K_0$ , вычисляемый методами средневзвешенного (арифметического, геометрического, гармонического и т. п.), чаще всего выражают в условных единицах, не имеющих физического содержания. Это обусловлено необходимостью соизмерения разных по физическому характеру параметров. При технико-экономическом анализе значения параметров  $K_i$  удобно представлять в виде индексов, которые численно определяют отношения разнородных параметров

$$K_i = k_i k_{i0}^{-1},$$

где  $k_i$ ,  $k_{i0}$  — численные значения параметров  $i$ -го свойства разрабатываемой системы и системы, принятой за базу для сравнения; выражается в различных единицах (например, м<sup>3</sup>/ч, пож/сут и т. п.).

<sup>1</sup> Количественная характеристика значимости данного параметра среди других параметров, входящих в показатель.

Показатель надежности системы противопожарного водоснабжения характеризует свойства системы выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных показателей в заданных пределах. Надежность работы системы противопожарного водоснабжения, водопроводных сооружений и оборудования отражает комплексное свойство системы, охватывающее безотказность, долговечность, ремонтнопригодность и сохраняемость.

Безотказность оценивается показателем  $P(t_p)$  — вероятностью безотказной работы за расчетное время

Вероятность безотказной работы  $P(t_p)$  позволяет определить свойство системы непрерывно сохранять работоспособность в течение установленного времени. Этот показатель устанавливают на основании обработки статистических данных по результатам эксплуатации или лабораторным испытаниям.

Показатель среднего срока службы до списания определяет долговечность системы и характеризует свойство ее сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при заданном регламенте технического обслуживания и ремонтов.

Значение среднего срока службы принимают по результатам обработки статистических данных с мест эксплуатации. При отсутствии данных значение показателя определяют согласно технической задаче или по техническим условиям на аналогичное по техническому уровню оборудование.

Ремонтнопригодность — свойство, характеризующее возможность восстановления системы водоснабжения в состояние готовности за данный интервал времени путем профилактики или устранения отказов. Ремонтнопригодность оценивают продолжительностью или трудоемкостью технического обслуживания и устранения отказов.

Показатель ремонтнопригодности представляет собой среднюю оперативную продолжительность (трудоемкость) планового (непланового) текущего ремонта и определяет математическое ожидание оперативной продолжительности планового (непланового) текущего ремонта системы за определенный период эксплуатации.

При проектировании системы необходимо учитывать



режимы предстоящей эксплуатации и рациональность системы технического обслуживания. При этом рассматривают трудоемкость технического обслуживания, условия беспрепятственного доступа к ремонтируемым узлам и агрегатам, удобство контроля за параметрами функционирования, взаимозаменяемость узлов и другие аспекты восстановления, ремонта и технического обслуживания водопроводных сооружений, узлов и агрегатов, входящих в систему водоснабжения. Ремонтнопригодность оценивают также показателем удельной относительной стоимости запасных частей, который определяется стоимостью комплекта товарных и покупных запасных частей, используемых при эксплуатации и капитальном ремонте системы за определенный период ее эксплуатации. Таким образом, совокупный показатель надежности включает перечисленные выше показатели, вклад каждого из которых в общий показатель надежности системы водоснабжения оценивается коэффициентом весомости. Ориентировочные значения численных показателей коэффициентов приведены ниже: вероятность безотказной работы—0,5; срок службы до списания—0,3; оперативная продолжительность (трудоемкость) технического обслуживания—0,2

Нормальная работа системы противопожарного водоснабжения нарушается из-за воздействия случайных событий, в результате которых выходят из строя отдельные ее элементы. Анализ и изучение вероятностных характеристик таких событий, а также оценка надежности действия систем относятся к теории надежности. Требуемую надежность систем противопожарного водоснабжения обеспечивают при проектировании, строительстве и эксплуатации

В процессе проектирования надежность систем учитывают показателями надежности, для определения которых формулируют требования, выбирают показатели и выявляют нормы надежности для заданного уровня качества функционирования.

Показатель технологичности системы противопожарного водоснабжения характеризует уровень технологии производства и строительства водопроводных сооружений, а также монтажа оборудования (насосно-силовых агрегатов, трубопроводной арматуры, средств автоматизации процессов водообеспечения потребителей и т. п.). Показатель технологичности оцени-

вается коэффициентом сборности (блочности), удельной массой металла и материалов.

Конструктивный показатель охватывает основные параметры технического решения (например, размеры насосной станции, протяженность и диаметр водопроводных линий, число пожарных гидрантов на водопроводной сети, высоту водонапорной башни, материалоемкость системы водоснабжения и т. п.) Коэффициент сборности оценивает простоту и удобство монтажа оборудования в процессе строительства, определяется отношением количества сборочных единиц, включая покупные, к общему количеству составных частей. Количество сборочных единиц и деталей определяют на основании данных спецификации. Удельную материалоемкость системы  $M_y$ , характеризующую степень технического совершенства системы и рациональность конструкторского замысла, рассчитывают по формуле

$$M_y = (M_c + M_a) / pT,$$

где  $M_c$  — материалоемкость системы,  $M_a$  — масса запасных частей на нормативный срок службы,  $p$  — полезный эффект или основной технический параметр,  $T$  — средний срок службы (до списания)

Показатели стандартизации и унификации оценивают коэффициентами применяемости и повторяемости. Коэффициент применяемости дает представление об уровне конструктивной преемственности составных частей в проектируемой системе водоснабжения. Коэффициент применяемости выражается отношением числа типоразмеров составных частей в системе (без оригинальных) к общему числу типоразмеров, входящих в систему составных частей. Коэффициент повторяемости устанавливает уровень внутрипроектной унификации системы противопожарного водоснабжения и взаимозаменяемость составных частей оборудования внутри того или иного водопроводного сооружения. Этот коэффициент выражает отношение повторяющихся составных частей к общему числу составных частей. Показатели удобства и безопасности эксплуатируемой системы определяют санитарно-гигиенические условия работы человека. Эти показатели учитывают комплекс гигиенических, антропометрических, физиологических, психологических свойств человека. Показатель соответствия изделия силовым возможностям человека дает оценку конструкции того или иного оборудования с точки зрения соответствия его силовым возможностям человека.

Этот показатель определяют методом экспертных оценок и оценивают величиной условного балла.

Каждый показатель качества имеет свою весомость<sup>1</sup>, устанавливаемую, как правило, экспертным методом и определяемую соответствующим коэффициентом весомости. Ниже приведены ориентировочные численные значения коэффициентов весомости показателей качества системы противопожарного водоснабжения:

Показатель	Коэффициент
Назначение . . . . .	0,45
Надежность . . . . .	0,3
Технологичность схемы и конструкций . . .	0,12
Стандартизация и унификация . . . . .	0,05
Удобство и безопасность эксплуатации . .	0,08

Для оценки уровня качества проектирования системы противопожарного водоснабжения применяют смешанный метод, заключающийся в сочетании дифференциального (для сравнения с аналогами и зарубежными образцами) и комплексного (для сравнения с аналогами и базовыми образцами) методов. Дифференциальный метод основан на сопоставлении значений показателей качества с соответствующей совокупностью значений показателей базового варианта. При таком сопоставлении определяют, достиг ли технический уровень разрабатываемой системы уровня показателей базовой системы. В основу комплексного метода оценки уровня качества положен обобщенный показатель качества системы, который представляет собой функцию от групповых единичных показателей качества системы. Показатели качества базового варианта системы должны соответствовать показателям качества, отвечающим современному уровню развития систем противопожарного водоснабжения, а также прогнозу развития научно-технического прогресса в области создания новых систем.

#### 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Система противопожарного водоснабжения должна иметь наиболее высокий уровень качества функционирования. Но повышение качества функционирования

<sup>1</sup> Количественная характеристика значимости данного показателя среди других показателей.

связано с дополнительными затратами на возведение и эксплуатацию системы. С другой стороны, возрастающие темпы развития систем противопожарного водоснабжения требуют экономии капитальных затрат и реализации простых проектных решений. Возникает необходимость согласования этих противоречивых интересов. Цель технико-экономического анализа в этом случае — найти оптимальное решение задачи. Как правило, проектировщик располагает несколькими вариантами проектных решений, которые отвечают одним и тем же требованиям, но отличаются техническим исполнением и экономичностью, и необходимо выбрать лучшее из них, которое подлежит реализации.

Главное содержание технико-экономического анализа — найти рациональные проектные решения при совместном рассмотрении вопросов проектирования, строительства и эксплуатации. Основным вопросом, возникающим при этом, является определение оптимального уровня качества функционирования. Это исключает излишние капитальные затраты, эксплуатационные расходы и неоправданно большие народнохозяйственные ущербы от пожаров.

### **Этапы технико-экономического анализа**

Технико-экономический анализ при решении задач проектирования систем противопожарного водоснабжения включает ряд типовых этапов. Первый этап — формулирование задачи и уточнение целей, поставленных перед системой. Эффективность капитальных вложений в систему противопожарной защиты оценивают по снижению уровня ущербов от возможных пожаров после ввода ее в действие, поэтому решения, принимаемые в проекте системы водоснабжения, экономически обосновывают с учетом будущей эксплуатации. Общая цель обоснования технического решения — отыскать наиболее рациональное использование объективно ограниченных ресурсов или повысить эффективность общественного труда. Конкретные цели анализа разнообразны, например: обоснование целесообразного соотношения между параметрами водопитателя и системы распределения воды; определение оптимальной интенсивности подачи воды для тушения пожаров; определение оптимального режима подачи воды для расчета элемен-

тов системы противопожарного водоснабжения; обоснование целесообразности замены оборудования водоросления другим оборудованием, обеспечивающим увеличение площади орошения защищаемой поверхности, и др. На втором этапе намечают возможные варианты проектного оформления, отличающиеся способами достижения поставленной задачи.

Для создания необходимых условий пожарной безопасности объекта строительные нормы и правила устанавливают допустимый уровень водообеспечения, который должен предусматриваться на стадии проектирования системы. Варианты проектных решений, разрабатываемые в соответствии с требованиями норм, оценивают экономически, сравнивая по критерию «минимумы приведенных затрат». При обосновании характеристик технических решений основных элементов системы устанавливают число вариантов с изменяющимися параметрами (например, для системы противопожарного водоснабжения: производительность подачи водопитателя, вместимость водисточников, пропускная способность систем подачи и распределения воды и т. д.). На этом этапе анализа используют метод сравнительной оценки экономической эффективности капитальных вложений с учетом эксплуатационных расходов. Экономическую эффективность варианта технического решения оценивают в таком случае по коэффициенту экономической эффективности

$$E_n = (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) / (K_2 - K_1), \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  — годовые эксплуатационные расходы по первому и второму вариантам,  $K_1$  и  $K_2$  — капитальные вложения по тем же вариантам.

Вариантный анализ позволяет выбрать из конкурирующих вариантов наиболее рациональный. Третий этап — наиболее ответственный — это установление критерия оптимизации, с помощью которого можно найти наибольший эффект от вложения средств или необходимый их минимум для достижения поставленной цели. Этот критерий должен учитывать капитальные затраты, эксплуатационные расходы и возможные ущербы от пожаров. В то же время он должен допускать возможность сравнения приведенных затрат в зависимости от изменения уровня качества функционирования в едином измерителе экономического эффекта.

Задача проектировщика заключается в установлении признаков, по которым отдается предпочтение тому

или иному решению. Критерий оптимизации в данном случае должен представлять собой соотношение между ожидаемым полезным эффектом (результатом) решения и связанными с ним затратами. Когда рассматриваемые варианты проектного решения имеют равноценный ожидаемый полезный эффект, в качестве критерия используют коэффициент экономической эффективности [см. формулу (4)]. В остальных случаях проектные решения нельзя оценивать с помощью этого критерия, поскольку он не определяет ожидаемого результата, который будет достигнут за наименьшую плату. Недостаточным будет этот критерий и для оценки решения, обещающего наибольший полезный эффект. Единой методикой выбора критериев, удовлетворяющих встречающиеся на практике ситуации, нет, поэтому в общем случае экономическую эффективность системы противопожарной защиты оценивают по коэффициенту экономической эффективности

$$E_n = [(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) + (Y_1 - Y_2)] / (K_2 - K_1),$$

где  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  — эксплуатационные расходы по первому и второму вариантам  $Y_1$  и  $Y_2$  — годовые ущербы от пожаров по тем же вариантам,  $K_1$  и  $K_2$  — капитальные вложения по тем же вариантам

Четвертый этап состоит в определении характерных затрат на основании сметно-финансовых расчетов, эксплуатационных расходов и возможных ущербов от пожаров, а также других характеристик, входящих в экономико-математическую модель оптимизации проектных решений. Этот этап анализа представляет собой расчетно-творческий процесс, для выполнения которого наиболее целесообразно применять вычислительную технику.

Пятый этап содержит математические операции построения экономико-математической модели и ее решения. При проектировании приходится находить решения, обеспечивающие экстремальные значения критерия эффективности. Эти задачи решают с применением специальных методов оптимизации. В простых случаях для этого достаточны элементарные модели арифметики и алгебры. В более сложных случаях приходится использовать модели, учитывающие влияние случайных факторов. Наиболее часто в практике проектирования систем водоснабжения используют метод перебора вариантов (слепой поиск), суть которого сводится к сравнению по выбранному критерию технических решений, отличающихся различным сочетанием основных

элементов. В ряде случаев для решения указанных задач рекомендуют методы математического (предельного) анализа, с помощью которых функцию эффективности выражают в зависимости от искомым переменных с последующим дифференцированием функции и приравнением производных нулю после соответствующего анализа на наибольшее или наименьшее значение функции. Для решения многомерных экстремальных задач (при наличии ограничений в области изменения переменных) применяют методы математического программирования. В наибольшей степени разработаны методы линейного программирования, предусматривающие нахождение экстремума линейных и целевых функций. Следует отметить, что зависимости полезного эффекта и затрат от параметров элементов проектных решений системы противопожарного водоснабжения, как правило, нелинейны, что требует использования специальных методов нелинейного программирования, реализация которых возможна лишь при использовании современных электронно-вычислительных машин.

Шестой этап — решение задачи и отыскание оптимального варианта на основе построенной экономико-математической модели, анализа полученных результатов и разработки рекомендаций.

Система противопожарного водоснабжения, как было сказано, представляет собой группу водопроводных сооружений, действующих совместно при выполнении поставленной задачи. Решение вопросов оптимизации системы в целом на основе технико-экономического анализа оказывается очень сложным, поэтому прибегают к решению оптимизации входящих в систему элементов или подсистем. Экономический анализ по частям требует сопоставления результатов частной оптимизации при получении единого комплексного критерия.

В проектном задании целесообразно приводить не один оптимальный вариант проектного решения системы, а несколько лучших (близких к оптимальному) с указанием затрат на каждый из них. Это дает возможность более детально рассмотреть варианты в процессе выбора окончательного решения и учесть возможности технического исполнения и социально-экономические соображения.

## Определение параметров экономически наиболее выгодного режима подачи воды

Многие задачи оптимизации успешно решают с помощью предельного анализа, основывающегося на нахождении экстремумов  $\max$  или  $\min$  соответствующих функций методами дифференциального исчисления. Рассмотрим этот метод отыскания оптимальных решений на примере.

Оценка эффективности установок тушения пожара представляет собой сложную техническую и экономическую задачу. При решении этих задач устанавливается оптимальный режим работы установки, при котором воду подают в очаг горения своевременно в заданных количествах с наименьшей затратой на строительство и эксплуатацию и для сокращения ущерба от пожаров.

Решение задачи выбора экономически наиболее выгодного режима работы по минимуму приведенных затрат  $\Pi$  выражается следующим образом:

$$\Pi = (p + E_{II}) \Sigma K + \Theta + Y \rightarrow \min,$$

где  $p$  — нормативные ежегодные отчисления на амортизацию установки;  
 $E_{II}$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,  
 $\Sigma K$  — сумма капитальных затрат на системы автоматического обнаружения и тушения пожаров, руб.,  $\Theta$  — заработная плата обслуживающего персонала, руб./год,  $Y$  — ущерб от пожара, руб./год.

Первое слагаемое — это приведенные затраты строительной стоимости систем автоматического обнаружения пожара и тушения, второе и третье слагаемые — основные эксплуатационные затраты и ущерб от пожаров. Капитальные затраты для установок автоматического тушения пожаров (АТП) ( $\Sigma K$ ) складываются из стоимости оборудования пуска (система обнаружения пожара и пуска установки) и стоимости оборудования подачи воды (система хранения, подачи и распределения воды). Стоимость оборудования пуска определяется видом пожарного извещателя, конструкцией сигнально-пусковой установки и конструктивными особенностями ее устройства. С повышением чувствительности, а следовательно, и уменьшением инерционности установки повышается стоимость оборудования. Стоимость оборудования пуска установки  $K_0$  представляется эмпирической формулой

$$K_0 = a + b \tau_{II}^{-m},$$

где  $a$ ,  $b$  и  $m$  — коэффициенты, характеризующие стоимость оборудования пуска (определяют при анализе сметно-финансовых расчетов);  $\tau_{II}$  — продолжительность пуска (инерционность).



Стоимость оборудования подачи воды определяется производительностью установки тушения  $K_T$  и зависит от продолжительности тушения, что выражается эмпирической формулой

$$K_T = c \cdot f \cdot \tau_T^{-n},$$

где  $c$ ,  $f$ ,  $n$  — коэффициенты, характеризующие стоимость оборудования и монтажа систем подачи воды (определяют при анализе сметно-финансовых расчетов или по укрупненным показателям стоимости),  $\tau_T$  — продолжительность тушения

Среднегодовой ущерб от пожаров для группы объектов с одинаковыми условиями пожарной опасности устанавливают методы математической статистики, на основании построения матричной модели материального ущерба от пожаров.

Уравнение множественной регрессии для расчета ущерба от пожара имеет вид:

$$Y = \alpha (Y_* + y_1 \tau_{н} + y_2 \tau_T + y_3 F_{п} - y_4 G),$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий косвенный ущерб, вызванный пожаром,  $Y_*$  — прямой ущерб от пожара, руб.,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  — параметры, определяемые при обработке статистических данных,  $\tau_{н}$  — продолжительность свободного горения (с момента загорания до начала тушения),  $\tau_T$  — продолжительность тушения пожара,  $F_{п}$  — наибольшая площадь пожара,  $G$  — расход средств тушения

Величина ущерба для группы объектов, имеющих одинаковое оборудование, сырье и готовую продукцию, зависит от вероятных последствий пожара, которые характеризуются количеством тепла  $Q$ , выделившегося в процессе свободного горения и тушения пожара. Задачей проектирования в этом случае будет определение оптимальной структуры установки тушения с использованием средств автоматического тушения очага пожара. Оптимизация проектного решения связана с рассмотрением большого числа возможных вариантов взаимосвязи элементов системы. Для исследования этого вопроса требуется значительный объем исходной информации.

Решение задач оптимизации требует преодоления противоречий, заключающихся в том, что увеличение величины параметра установки автоматического обнаружения пожара приводит к уменьшению величины параметра установки автоматического обнаружения пожара. Оптимальное распределение капитальных затрат должно обеспечить максимальный суммарный эффект комплекса в целом. Аналитический метод выбора опти-

мальной структуры установки автоматического тушения пожаров изложен ниже

Переменную часть величины приведенных затрат для установки автоматического обнаружения и тушения пожаров можно представить в виде функции неизвестных  $\tau_n$ ,  $\tau_T$ :

$$П = (p + E_n) (a - c + b\tau_n^{-m} + f\tau_T^{-n}) + \sigma g (\tau_n + \tau_T/2).$$

Задача сводится к нахождению оптимального режима работы установки, которому соответствуют  $\tau_n^*$  и  $\tau_T^*$ , определяющие экономически наиболее выгодный вариант при заданных величинах  $p$ ,  $E_n$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $f$ ,  $m$ ,  $n$

Прежде всего необходимо выяснить, имеет ли функция  $П$  экстремальные значения, при каких значениях  $\tau_n$  и  $\tau_T$  они имеют место.

В результате дифференцирования по  $\tau_n$  получим

$$\partial П / \partial \tau_n = - (p + E_n) m b \tau_n^{-(m+1)} + \sigma g = 0. \quad (5)$$

После соответствующих преобразований получим

$$\tau_n^* = [m b (p + E_n) / (\sigma g)]^{1/(m+1)}.$$

В результате дифференцирования по  $\tau_T$  получим

$$\partial П / \partial \tau_T = - (p + E_n) n f \tau_T^{-(n+1)} + \sigma g / 2 = 0. \quad (6)$$

После соответствующих преобразований получим

$$\tau_T^* = [2 n f (p + E_n) / (\sigma g)]^{1/(n+1)}.$$

Остается исследовать характер экстремума функции  $П$  и выяснить, является ли точка кривой  $П = f(\tau_n, \tau_T)$ , полученная из уравнений (5) и (6) и имеющая координаты  $\tau_n^*$ ,  $\tau_T^*$ , минимумом функции  $П$ .

Вторые производные функции  $П$  по переменным  $\tau_n$  и  $\tau_T$  будут иметь вид:

$$\partial^2 П / \partial \tau_n^2 = (p + E) (m + 1) m b \tau_n^{-(m+2)};$$

$$\partial^2 П / \partial \tau_T^2 = (p + E) (n + 1) n f \tau_T^{-(n+2)};$$

$$\partial^2 П / (\partial \tau_n \partial \tau_T) = 0$$

Условием наличия экстремума функции двух переменных является положительный знак гессиана функции:

$$\begin{vmatrix} \partial^2 П / \partial \tau_n^2 & \partial^2 П / (\partial \tau_n \partial \tau_T) \\ \partial^2 П / (\partial \tau_T \partial \tau_n) & \partial^2 П / \partial \tau_T^2 \end{vmatrix} > 0.$$

Поскольку величины

$$\partial^2\Pi/(\partial\tau_T\partial\tau_n) = \partial^2\Pi/(\partial\tau_n\partial\tau_T)$$

согласно теореме Шварца, это условие может быть записано так:

$$(p + E_n) (m + 1) mb/\tau_n^{m+2} (p + F_n) (n + 1) nf/\tau_T^{n+2} > 0. \quad (7)$$

Рассматривая сомножители выражения (7) при исследовании экстремума переменной части величины приведенных затрат, выраженной в функции двух переменных  $\tau_n$  и  $\tau_T$ , при всех практически возможных значениях  $p$ ,  $E_n$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $f$  можно сказать, что знак выражения (7) зависит от величин  $\tau_n$ ,  $\tau_T$ . Величины  $\tau_n$ ,  $\tau_T$  вошли в функцию как выражение параметров установки тушения, поэтому они могут быть только положительными. Следовательно, выражение (7) будет всегда положительно. Это свидетельствует о том, что функция  $\Pi(\tau_n, \tau_T)$  имеет экстремум в точке  $\tau_n^*$ ,  $\tau_T^*$ , которая и представляет минимум функции, так как  $d^2\Pi/d\tau_n^2 > 0$ .

Таким образом, полученные выражения для  $\tau_n^*$ ,  $\tau_T^*$  дают наиболее выгодные режимы работы установки АТП. Задаваясь предварительными значениями  $\tau_n$  и  $\tau_T$  с учетом требований надежности противопожарной защиты, определяют наименее выгодные режимы работы установки из условия

$$\tau_n \leq \tau_n^* \text{ и } \tau_T \leq \tau_T^*$$

Автором получена формула для определения площади возможного пожара, необходимая для определения расхода воды:

$$I^*_{\text{н}} = Q/[g_0(\tau_n^* + \tau_T/2)]$$

Используя эмпирическую формулу для расчета удельного расхода воды, определяют расход средств тушения при наиболее выгодном режиме

$$G^* = I^*_{\text{н}} \cdot \tau_n^* = [a + b/(\tau_T - \tau_{0T})] I^*_{\text{н}}$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $\tau_{0T}$  — параметры, определяемые в процессе испытаний

Описанный метод оптимизации предполагает, что проектировщик имеет совокупность различных средств автоматического обнаружения и тушения пожаров

Следует отметить, что необходимость использования стандартного оборудования (пожарных извещателей, насосов, труб и др.) вносит в процесс технико-экономического расчета затруднения. При выборе оптимальной

схемы задачу решают методом вариантного проектирования, используя технико-экономические расчеты элементов системы и комбинацию различных элементов в их взаимосвязи. В результате последовательного приближения выбирают стандартные виды элементов оборудования (ближайшие к наивыгоднейшим) и уточняют фактические режимы установки в целом. Полученные зависимости позволяют обоснованно выбрать наивыгоднейшие режимы совместной работы системы автоматического включения и оборудования хранения, подачи и распределения воды. Примером использования предельного анализа могут служить также задачи оптимизации числа действующих при пожаре спринклеров, которые описаны ниже.

### Оптимизация надежности системы противопожарного водоснабжения

Рассмотрим вопрос оптимизации надежности системы, состоящей из водоисточника, водопитателя и распределительных сетей, и оценим влияние приведенных затрат комплекса водопроводных сооружений на надежность системы. Определим минимум приведенных затрат по заданному уровню надежности. Надежность системы  $P^*_0$  задают таким образом, чтобы приведенные затраты были минимальными. Задача сводится к минимизации функции  $\Pi =$

$$-\sum_{i=1}^n \Pi_i$$
 ( $\Pi_i$  — приведенные затраты  $i$ -го элемента системы) при ограничении

$$\left. \begin{aligned} 1 - P_0^* &= \prod_{i=1}^n (1 - P_{0i}^i); \\ \ln(1 - P_0^*) &= \sum_{i=1}^n \ln(1 - P_{0i}^i), \end{aligned} \right\}$$

где  $P_{0i}$  и  $P_0^*$  — коэффициенты бесперебойности водоснабжения  $i$ -го потребителя и системы

Функциональная зависимость  $\Pi_i = f(P_{0i})$  считается известной и задается при расчете. Для нахождения условного минимума функции  $\Pi$  от переменных  $P_{0i}$  используем метод неопределенных множителей Лагранжа. Функцию Лагранжа представим в виде

$$L(P_{01}, P_{02}, \dots, P_{0n}) = \sum_{i=1}^n \Pi_i + \lambda \sum_{i=1}^n \ln(1 - P_{0i}),$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа

Используя известные методы, получаем систему уравнений для определения  $\lambda$ :

$$\left. \begin{aligned} \partial \lambda (P'_{01}, P'_{02}, \dots, P'_{0n}) / \partial P_{0i} &= 0, \\ \sum_{i=1}^n \ln(1 - P_{0i}) &= \ln(1 - P_{0i}^*). \end{aligned} \right\}$$

Отсюда можно получить

$$\partial \left[ \sum_{i=1}^n \Pi_i + \lambda \sum_{i=1}^n \ln(1 - P_{0i}) \right] / \partial P_{0i} = \partial \Pi_i / \partial P_{0i} - \lambda / (1 - P_{0i}) = 0$$

или

$$d\Pi_i = \lambda \partial P_{0i} / (1 - P_{0i}), \quad \Pi_i = -\lambda \ln(1 - P_{0i}) + C_i$$

Оптимальные приведенные затраты для каждого элемента системы определяют в зависимости от коэффициента бесперебойности  $P_{0i}$  по графикам  $\ln P_{0i} = f(\Pi_i)$ ,  $\ln P_{02} = \varphi(\Pi_2)$  и т. п. Графоаналитический метод решения задачи с помощью итераций широко используются в практике, когда решение уравнений аналитически вызывает трудности. Для приближенных расчетов (с ошибкой не более 4%) экспоненциальная функция в интервале  $P(x) \in [1, 0,6]$  может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Тогда минимум приведенных затрат во данному уровню надежности можно определять методом подстановки и методом неопределенных множителей Лагранжа. Использование современных вычислительных средств и аппарата экономико-математических исследований способствовало успешному решению ряда задач оптимизации систем, постановка которых ранее казалась пересальной. При решении задач технико-экономического анализа необходимо знать капитальные вложения, эксплуатационные расходы, ущербы от пожаров.

## Капитальные вложения

Капитальные вложения определяют в результате сметно-финансовых расчетов. Для удобства технико-экономического анализа и возможности применения вычислительной техники при расчетах выявляют характеристики капитальных вложений для элементов системы. Эти характеристики представляют собой зависимости величины капитальных вложений от наиболее характерного для них признака. Например, характеристики капитальных вложений сооружений системы водоснабжения аппроксимированы следующими моделирующими уравнениями.

Стоимость бурения скважин

$$S = nH(0,134gc/n + 36,6)$$

Стоимость оголовников насосной станции I подъема

$$S=660 \text{ руб/шт}$$

Стоимость насосной станции I подъема с гидропневматическим баком

$$S=5,5Q^{0,75}+1280$$

Стоимость насосной станции II подъема с гидропневматическим баком

$$S=6,85Q^{0,75}+1600$$

Стоимость насосной станции (с двумя насосами)  
 $S=1920$  руб.

Стоимость насосной станции II подъема (с тремя насосами)  $S=2930$  руб.

Стоимость оборудования в насосной станции I подъема  $S=3550$  руб.

Стоимость оборудования в насосной станции II подъема (пожарный насос отсутствует)

$$S=3,9g+923$$

Стоимость оборудования в насосной станции II подъема (пожарный насос имеется)

$$S=5,1g+980$$

Стоимость открытого пожарного резервуара

$$S = (80 \sqrt{Q} + 12 \cdot C) n_p.$$

Стоимость оборудования в насосной станции I подъема с гидропневматическим баком

$$S = (12Q^{0,75}+560) + (1,6Q^{0,75}+450),$$

Стоимость оборудования в насосной станции II подъема с гидропневматическим баком

$$S = (15Q^{0,75}+700) + (2Q^{0,75}+560),$$

где  $n$  — число скважин,  $H$  — глубина скважин, м,  $g_c$  — производительность скважины, м<sup>3</sup>/ч,  $g$  — часовая производительность насосной станции, м<sup>3</sup>/ч,  $Q$  — среднее водопотребление, м<sup>3</sup>/сут,  $n_p$  — число водоемов

Наиболее характерным признаком при определении капитальных затрат на спринклерно-дренчерное оборудование является защищаемая системой площадь.

Технико-экономические показатели системы пожарной защиты во многом зависят от принятой принципиальной схемы. Это можно проиллюстрировать на

примере системы автоматической противопожарной защиты цехов производства капролактама.

Технико-экономические показатели спринклерной установки в цехе гидрирования бензола приведены ниже

Развернутая площадь, м <sup>2</sup> . . . . .	2540,7
Защищаемая площадь здания, м <sup>2</sup> . . . . .	2540,7
Стоимость, тыс. руб.:	
здания (без технологического оборудования) . . . . .	2266,5
спринклерной установки . . . . .	64,9
Стоимость, руб.:	
1 м <sup>2</sup> развернутой площади здания . . . . .	890
спринклерной установки на 1 м <sup>2</sup> защищаемой площади . . . . .	25,6

Автоматическая установка пенного пожаротушения в цехе получения капролактама имеет следующее устройство. Вода для установок пенотушения подается из водопровода диаметром 400 мм. Для дозирования заданного количества пенообразователя на вводе установлен дозатор, в который пенообразователь поступает из централизованной системы подачи. На вводе установлены контрольно-пусковой узел дренажной водяной установки и контрольно-пусковые узлы десяти секций водопенной установки. Каждая секция оборудована системой электрической пожарной сигнализации и побудительной сетью трубопроводов с пожарными извещателями, реагирующими на скорость изменения температуры окружающей среды при возаре. В качестве первичных средств тушения пожара предусмотрены ручные пенные стволы, которые подключены к вводу установки через самостоятельные контрольно-пусковые узлы. Здание цеха капролактама — многоэтажное, размером в плане 24×78,4 м, высотой (до низа несущих конструкций покрытия) 36 м. Конструкции — сборные железобетонные. Категория пожарной опасности А. Производственное помещение разделено противопожарной стеной на два отсека. В торце размещены подсобно-производственные помещения. В здании предусмотрены две капитальные лестничные клетки, которые отделены от производственных отделений огнестойкими стенами и сообщаются с ними через тамбур.

В цехе капролактама автоматическая установка пенного пожаротушения имеет следующие показатели: расчетный расход 175 л/с, число секций — 12 шт, общее число пенных оросителей — 300 шт, спринклеров (побудительная система) — 250 шт, пожарных извещателей — 16 шт.

Водяная (дренажная) установка цеха капролактама имеет следующие показатели: расчетный расход 60 л/с, число секций — 1 шт, оросителей — 40 шт.

Технико-экономические показатели установок тушения в цехе капролактама следующие

Развернутая площадь здания, м <sup>2</sup> . . . . .	9368,1
Защищаемая площадь здания, м <sup>2</sup> . . . . .	3161
Стоимость, тыс. руб.	
здания (без оборудования) . . . . .	6119,85
установок пожаротушения . . . . .	74,7
% стоимости здания . . . . .	1,22

Стоимость, руб.:

1 м <sup>2</sup> развернутой площади здания . . . . .	650
установок АТП на 1 м <sup>2</sup> защищаемой площади	24,3

Все пожароопасные цеха производства капролактама защищены автоматическими установками тушения, технико-экономические показатели которых приведены в табл. 7.

Автоматические пенные установки имеют следующие показатели: рабочее давление в противопожарном водопроводе — 1 МПа, рабочее давление у генератора пены — 0,5 МПа, расход 4%-ного водного раствора пенообразователя — 180 л/с, расчетное время тушения пеной — 15 мин, расчетное время тушения водой — 1 ч, расчетный запас пенообразователя — две емкости (по 12 т каждая), емкость автоматического водопитателя — два бака (объемом 65 м<sup>3</sup> каждый).

Дренчерные водяные установки имеют следующие показатели: удельный расход воды — 0,12—0,5 л/(м<sup>2</sup>·с), расчетный напор у оросителя — 0,1—0,3 МПа, расчетный радиус орошения — 0,5—2,5 м, производительность оросителя — до 3,3 л/с.

Спринклерные водяные установки имеют следующие показатели: удельный расход воды — 0,085—0,17 л/(м<sup>2</sup>·с), расчетное давление у спринклера — 0,05—0,15 МПа; производительность спринклера — 0,85—1,75 л/с, температура плавления замка — 70°C и выше.

Стоимость контрольно-пусковых узлов составляет 10 %, питательных трубопроводов 25 %, распределительных трубопроводов 45 % и арматуры (спринклеров, дренчеров и пр.) 20 % общей стоимости установки.

Приведенные в табл. 7 технико-экономические показатели заимствованы из проекта акционерного общества «Континенталь энджиринг» (Нидерланды), разработанного для производства капролактама в г. Гродно.

Под руководством автора разработаны принципиально новые установки пожаротушения, которые имеют более высокие технико-экономические показатели по сравнению с установками пожаротушения, используемыми в развитых капиталистических странах. Эти установки, предназначенные для автоматического обнаружения очага пожара, подачи тревоги и локально-объемного тушения пожара пламени легковоспламеняющихся и горючих жидкостей воздушно-механической пеной, успешно внедряются. Технико-экономические показате-



Таблица 7. Технико-экономические показатели установок пожаротушения

Цех	Установка пожаротушения	Расчетный расход, л/с	Число секций, шт.	Число оросителей, шт.	Защищаемая площадь, м <sup>2</sup>	Стоимость	
						установки пожаротушения	тыс. руб.
1	2	3	4	5	6	7	8
Гидрирования бензола	Пенная Спринклерная	180	8	263	2370	61,5	26
		42	1	58	522	3,4	6,5
Окисления	Пенная Дренчерная Спринклерная	72	1	178	1600	41,6	16
		62	1	36	324	4,2	13
		42	1	48	430	2,8	6,5
Рециркуляции	То же	165	9×2	516	4640	120	25,9
		75	1	50	450	5,9	13,1
		42	1	15	117	0,76	6,52
Получения капролактама	Пенная Дренчерная	175	1	300	2700	70	25,95
		60	1	40	360	4,7	13,1
Получения н склад сульфата аммония	Спринклерная	42	1	100	900	5,86	6,52
		42	2	400	3600	23,5	6,52
Промежуточный склад	Дренчерная	85	1	180	1620	21	13

**Таблица 8. Техничко-экономические показатели установок пенного пожаротушения**

Размер секции, м×м	Число одновременно действующих секций при пожаротушении, шт.	Расход водного раствора пенообразователя, л/с	Стоимость установки	
			тыс. руб.	руб/м <sup>2</sup>
12×12	4	70	27,7	2,66
12×12	6	104	27,7	2,66
12×12	9	156	27,7	2,66
18×18	4	156	23	2,22
18×18	6	234	23	2,22
18×18	8	350	23	2,22

ли установок пенного пожаротушения приведены в табл. 8.

Установка пенного тушения состоит из водопровода, автоматического дозатора пенообразователя, емкости с пенообразователем, запорно-пускового узла, генераторов пены, пожарного отсека для ограничения площади разлива горючей жидкости и датчиков, реагирующих на пожар.

Техничко-экономические показатели пенной установки локального действия для защиты цеха полимеризации завода синтетического каучука приведены ниже

Строительный объем здания, тыс. м <sup>3</sup> . . . . .	100
Расчетный расход (по раствору), л с . . . . .	175
Число секций, шт. . . . .	24
Число генераторов, шт. . . . .	150
Продолжительность работы, мин . . . . .	20
Запас воды, м <sup>3</sup> . . . . .	200
Запас пенообразователя, м <sup>3</sup> . . . . .	10
Стоимость установки, тыс. руб . . . . .	5,6
Стоимость установки на 1 м <sup>2</sup> защищаемой площади, руб/м <sup>2</sup> . . . . .	5,1

Техничко-экономические показатели автоматической установки пенного пожаротушения в экстракционном цехе маслоэкстракционного завода приведены ниже

Расчетный расход (по раствору), л с . . . . .	240
Напор на вводе, м . . . . .	60
Число секций, шт. . . . .	7
Число генераторов пены, шт. . . . .	80
Продолжительность работы установки, мин . . . . .	15
Запас воды, м <sup>3</sup> . . . . .	200
Запас пенообразователя, м <sup>3</sup> . . . . .	8
Стоимость установки тушения, тыс. руб. . . . .	10,3
Стоимость установки пожаротушения, отнесенная на 1 м <sup>2</sup> защищаемой площади, руб/м <sup>2</sup> . . . . .	6,05

В отличие от установки поверхностного действия установки локально-поверхностного действия защищают наиболее пожароопасные участки промышленного здания и расположенное в них технологическое оборудование, поэтому стоимость защиты 1 м<sup>2</sup> поверхности обходится дороже, чем при защите установками поверхностного действия. Если стоимость установки локально-поверхностного действия отнести к полной площади производственного здания, то такие установки могут оказаться дешевле, чем установки поверхностного действия. Если сравнить стоимость установки локального действия со стоимостью установки поверхностного действия, то окажется, что стоимость установки локально-поверхностного действия, отнесенная к полной площади, в два раза меньше стоимости установки поверхностного действия.

Общая стоимость установки тушения пожаров  $C_0$  складывается из стоимости установки тушения  $C_y$  (оборудование внутри цеха или сооружения) и стоимости внешних сооружений водопитателя  $C_b$  (инженерных сооружений, расположенных вне защищаемого объекта). Стоимость установки тушения внутри цеха определяют по формуле

$$C_0 = C_1 F,$$

где  $C_1$  — стоимость установки (оборудования внутри объекта) отнесенная к 1 м<sup>2</sup> защищаемой поверхности руб/м<sup>2</sup>,  $F$  — площадь защищаемой поверхности, м<sup>2</sup>

Стоимость водопитателя установки изменяется в широком диапазоне в зависимости от условий водоснабжения защищаемого установкой тушения объекта. Например, при наличии водопровода с достаточным для работы установки тушения напором и расходом воды затраты на водопитатель будут минимальными и в зависимости от расхода воды составят 5—9 %  $C_y$ .

Стоимость водопитателя (без сооружения насосной станции) определяют по формуле

$$C_b = \alpha C_y,$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от расхода воды  $C_y$  — стоимость установки руб

Ниже приведена зависимость коэффициента  $\alpha$  от расчетного расхода воды (л/с).

Расход воды . . . . .	20	30	40	50	70	100	150	230	350
$\alpha$ . . . . .	1,05	1,15	1,22	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9

Если такой водопитатель отсутствует, сооружают самостоятельный водопитатель с резервуаром чистой воды и насосной станцией.

Стоимость инженерных сооружений (резервуаров чистой воды, насосной станции и водоводов) определяют по формуле

$$C_B = \beta N + C_T l + \kappa W,$$

где  $\beta$  — стоимость 1 кВт установочной мощности, руб.,  $N$  — установочная мощность водопитателя, кВт,  $C_T$  — стоимость 1 водовода, руб.;  $l$  — длина водовода, м;  $\kappa$  — стоимость 1 м<sup>3</sup> резервуара чистой воды, руб.,  $W$  — объем резервуара, м<sup>3</sup>.

Значение  $\beta$  для расчетов стоимости принимают равным 70—80 руб. Стоимость водовода зависит от диаметра трубопровода, материала труб и категории грунтов, в которых его прокладывают. Ниже приведена стоимость (руб.) водопроводов из стальных труб, проложенных в грунтах I—II категории, в зависимости от диаметра трубопроводов (мм):

Диаметр трубопроводов . . . . .	100	150	200	300	400
Стоимость . . . . .	4,02	6,11	8,54	14,5	21,7

Значения  $\kappa$  для расчетов стоимости железобетонных резервуаров принимают равными 20—30 руб.

Затраты на возведение резервуаров чистой воды составляют 20 %, насосной станции 20—60 %, водоводов 20—60 % стоимости инженерных сооружений. В установках водопенного тушения затраты на сооружение резервуаров чистой воды составляют 15 %, насосной станции (с дозаторами и емкостями для пенообразователя) 20—65 %, водоводов 20—65 % стоимости установки. На основании проведенных исследований установлены значения стоимости водопитателей установок автоматической пожарной защиты (при расходе воды 70—350 л/с; напоре 60—80 м, протяженности водоводов до 200 м и продолжительности работы установки до 20 мин). Стоимость инженерных сооружений (тыс. руб.) в зависимости от расчетного расхода воды (л/с) приведена ниже:

Расход воды . . . . .	70	100	150	230	350
Стоимость . . . . .	18	25	30	38	50

Для оценки капитальных затрат на систему противопожарной защиты здания необходимо знать общую стоимость (оборудования внутри объекта и сооруже-

ний, расположенных вне защищаемого объекта), отнесенную к 1 м<sup>2</sup> (1 м<sup>3</sup>) защищаемой поверхности (объема). Стоимость защиты 1 м<sup>2</sup> поверхности объекта установкой пожаротушения с водопитателем (без сооружения насосной станции) определяют по формуле

$$C_0 = (1 + \alpha) C_1.$$

Стоимость защиты 1 м<sup>2</sup> поверхности установкой пожаротушения с водопитателем, содержащим насосную станцию, резервуары чистой воды и водоводы, определяют по формуле

$$C_0 = C_1 + (C_B / F) (Q / \Sigma Q), \quad (8)$$

где  $C_1$  — стоимость оборудования внутри защищаемого объекта, отнесенная к 1 м<sup>2</sup> защищаемой поверхности, руб.;  $C_B$  — стоимость водопитателя — инженерных сооружений (насосной, резервуаров, водоводов), руб.;  $F$  — поверхность, защищаемая установкой пожаротушения, м<sup>2</sup>;  $Q$  — расчетный расход установки, л/с  $\Sigma Q$  — сумма расчетных расходов установок, обслуживаемых водопитателем, л/с

Значение  $C_B$  определяют в зависимости от расчетного расхода воды. При этом из группы обслуживаемых водопитателем установок выбирают такую, расчетный расход воды для которой имеет максимальное значение. В табл. 9 приведены показатели стоимости элементов установок тушения пожаров в производстве капролактама, подсчитанные по формуле (8).

Ниже приведены технико-экономические показатели установок пенного пожаротушения, разработанных по рекомендациям ВНИИПО и Акционерного общества «Континенталь энджинеринг» для автоматической пожарной защиты производственных зданий с категорией опасности А.

	ВНИИПО „Континенталь энджинеринг“	
Производительность, л/с . . . . .	170	170
Напор, м . . . . .	60	100
Стоимость оборудования внутри цеха, руб/м <sup>2</sup> . . . . .	2,7—6,05	26
Стоимость инженерных сооружений, руб/м <sup>2</sup> . . . . .	18—27	22—32
Общая стоимость установки, руб/м <sup>2</sup> . . . . .	до 28	до 58
Стоимость установки, % строительной части защищаемого здания . . . . .	до 3,1	до 6,4

Капитальные вложения на оборудование производственных зданий установками автоматической противопожарной защиты изменяются от 2 до 6,5% стоимости

Таблица 9. Показатели стоимости элементов установок пожаротушения

Цех	Стоимость, тыс. руб			Общая стоимость, % стоимости строительной части
	инженерного оборудования С <sub>2</sub>	установки внутри цеха, С <sub>1</sub>	общая, С <sub>0</sub>	
Гидрирования	79,2	64,9	144,1	6,4
Окисления	62,8	48,6	111,4	3,56
Ректификации	73,8	106,7	200,5	4,4
Капролактама	87,4	74,7	162,1	2,64
Сульфата аммония	15	5,9	20,9	8,5
Кристаллизации	15	23,5	38,5	1,88
Промежуточный склад	30,4	21	51,4	12,6
Итого	363,6	365,3	728,9	—

строительной части здания. Капитальные вложения в элементы противопожарной защиты административных и общественных зданий (% стоимости строительной части здания) приведены ниже

Строительные конструкции (создание огнестойкости) . . . . .	0,1
Инженерные сооружения (канаты, шахты, брендмауэры и др.) . . . . .	0,1
Первичные средства тушения пожаров (внутренний пожарный водопровод) . . . . .	0,5
Пути эвакуации . . . . .	0,7
Всего . . . . .	1,4

Ниже приведены капитальные вложения в систему противопожарной защиты строительной части (% стоимости).

Строительные конструкции . . . . .	0,83
Огнестойкие потолки, перегородки и двери . . . . .	0,62
Инженерные сооружения . . . . .	0,5
Дымовая вентиляция . . . . .	0,2
Пути эвакуации (лестничные клетки, крышесые люки) . . . . .	0,4
Специальное противопожарное водоснабжение . . . . .	2,2
Первичные средства тушения пожаров . . . . .	0,3
Всего . . . . .	5,05

Наибольшими являются капитальные вложения в системы специального противопожарного водоснабжения, которые в промышленных зданиях в ряде случаев достигают 5—7 % общей стоимости строительства здания.

Внедрение системы противопожарной защиты дает иногда возможность резко сократить сроки введения объекта в строй. Например, применение системы автоматизированного противопожарного водоснабжения на лакокрасочном заводе позволило заменить при строительстве производственных зданий железобетонные конструкции металлическими и значительно уменьшить сроки их строительства. Техничко-экономический анализ вариантов технических решений в данном случае заключается в сопоставлении разновременных экономических показателей. В этом случае необходимо, чтобы сопоставляемые величины затрат и полезного эффекта были оценены с экономических позиций. При сопоставлении стоимости объектов с различными уровнями эффективности систем противопожарного водоснабжения, внедрение которых влияет на продолжительность постройки, необходимо их фактическую стоимость (в текущих ценах) привести к стоимости на базисный год (относительно которого определены индексы цен).

### Ущерб от пожаров

При сравнении вариантов технических решений возникает необходимость определения ущерба от пожара. Общий ущерб от пожаров учитывает затраты на внеплановый ремонт, которые определяют в результате оценки последствий (составления сметно-финансовых расчетов) для ликвидации вызванных пожаром неисправностей, ущерб от стоимости невыработанной продукции, стоимость простоя рабочей силы и оборудования, стоимость потерь, связанных с нарушением технологического процесса, и выход из строя технологического оборудования в результате возникшего пожара, а также ущерб, связанный с гибелью или получением пострадавшими телесных повреждений. Ущерб в этих случаях рассчитывают по формуле

$$Y = aN + bM + cL,$$

где  $Y$  — ущерб от пожара, руб/год,  $a$  — математическое ожидание прямого ущерба от одного пожара, руб.,  $N$  — интенсивность возникновения пожаров, год<sup>-1</sup>,  $b$  — математическое ожидание косвенного ущерба от 1 ч простоя технологического процесса руб/год,  $M$  — математическое ожидание суммарной длительности простоя, вызванного пожаром, ч/год,  $c$  — ущерб, связанный с гибелью одного человека или получением пострадавшим телесных повреждений  $L$  — число человеческих жертв в году

Следует отметить, что для расчета ущерба от пожаров необходимо иметь объективную исходную ин-

формацию об ущербах от пожаров. Проведенные автором исследования показывают, что прямой ущерб от пожаров является случайной величиной, распределение которой достаточно хорошо описывается законом Вейбулла:

$$P\{Y \leq Y_n\} \equiv P(Y) = 1 - \exp \{-(Y/Y_*)^k\},$$

где  $P\{Y \leq Y_n\}$  — вероятность того, что все значения переменной величины  $Y$  будут меньше детерминированной (фиксированной при любых условиях) величины  $Y_n$  или равны ей;  $Y$  — ущерб от возможного пожара, тыс. руб.,  $Y_* = \bar{Y}/\Gamma[(1+k)/k]$  — параметр распределения;  $\bar{Y}$  — математическое ожидание ущерба, тыс. руб.;  $\Gamma[(1+k)/k]$  — гамма-функция,  $k$  — константа распределения

## 5 ПОСТРОЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Наиболее рациональную структуру системы, отвечающую оптимальному решению, выбирают в результате рассмотрения технико-экономических показателей конкретных вариантов решений систем противопожарного водоснабжения. В основе построения рациональной структуры лежит системный подход к решению задачи, позволяющий разработать алгоритм расчета характеристик элементов и компоновки узлов системы, прогнозировать поведение водопроводных сооружений в условиях предстоящей эксплуатации, оценить показатели надежности и экономичности решения и отыскать параметры, характеризующие оптимальный режим работы системы.

Определение рационального варианта решения включает следующие этапы:

- постановку задачи и уточнение цели;
- создание вариантов решения, отличающихся способом достижения поставленной задачи;
- определение номенклатуры параметров показателя качества функционирования системы;
- определение слагаемых приведенных затрат, включая капитальные вложения на возведение сооружений, издержки эксплуатации и потери в результате пожаров;
- отыскание наиболее рационального варианта технического решения, отвечающего наибольшему значению критерия эффективности.

В результате анализа необходимо:

- выявить наиболее весомые факторы, определяющие слагаемые комплексного показателя качества функционирования создаваемой системы;



определить численные значения показателей качества функционирования и экономичности для оценки критерия эффективности вариантов решения;

оценить показатели эффективности вариантов решений для основных сооружений, необходимые для анализа и синтеза рациональной структурной схемы компоновки водопроводных сооружений.

## **6. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА СИСТЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

При выборе рациональной схемы компоновки водопроводных сооружений предварительно используют показатели, позволяющие установить техническую и экономическую целесообразность варианта решения. Впоследствии применяют более подробный анализ технико-экономических показателей выбранной модели технического решения. При этом принимают во внимание:

значимость (главенство) элементов системы [с помощью показателей значимости (весомости)], — количественно оценивающих вклад каждого элемента системы в решение поставленной перед системой цели;

структурную схему и принцип действия системы (с помощью комплекса отношений, позволяющих определить значимость отношений между элементами системы);

параметры, позволяющие качественно оценить вклад каждого элемента в общий функциональный показатель системы (выявить наиболее слабые места в связях между элементами, разработать программу реализации принятого решения и детально исследовать работоспособность системы);

надежность работы системы (характеризующую безотказность работы системы, условия обнаружения причин аварий и устранения их, а также трудоемкость технического обслуживания);

показатели безопасности работы операторов, характеризующие условия их работы при эксплуатации и техническом обслуживании системы под воздействием механических и электрических факторов, а также ядовитых и взрывчатых паров, представляющих угрозу для жизни и здоровья человека;

экологические показатели, определяющие уровень вредного воздействия воды и химических водных рас-

творов на материальные ценности и окружающую среду при испытаниях, ложных срабатываниях, утечке этих компонентов во время эксплуатации системы;

эффективность работы системы и экономичность предлагаемого технического решения.

При анализе вариантов технического решения учитывают опыт проектирования аналогичных объектов; показатели назначения системы (время подачи воды для тушения, режим подачи воды, инерционность включения подачи воды и т. п.); экономические условия. Наилучший вариант технического решения выбирают в результате обоснования задачи, построения альтернативных вариантов структуры системы, генерирования технического решения, обоснования принимаемого варианта.

На уровне 0 рассматривают характеристику объекта в отношении режима водообеспечения и его стоимость; характеристику пожарной опасности объекта (пожарную нагрузку в зданиях и сооружениях, частоту возникновения пожаров, вероятность человеческих жертв и размеры возможного ущерба от пожаров, косвенные потери в результате простоя); требования защиты окружающей среды (био-, гидро- и атмосферы).

На уровне I анализируют архитектурно-планировочные условия объекта (площадь пола между пожарными отсеками, высоту технологических аппаратов, объем помещений); требования к пожарным разрывам; характеристики инженерных сооружений; мощность энергообеспечения; производительность промышленного водоснабжения и др.

На уровне II рассматривают задачи наиболее рационального применения систем противопожарного водоснабжения; уточняют требования функционального назначения; выявляют режимы потребления и расходования воды; определяют уровень бесперебойности подачи воды; рассчитывают инерционность включения подачи воды, намечают схемы подачи и распределения воды; назначают напор воды в расчетных точках системы; намечают конструктивное исполнение основных водопроводных сооружений; уточняют номенклатуру параметров, характеризующих показатель качества функционирования.

На уровнях II и III решают вопросы анализа и синтеза структуры. На уровне III представляют пред-

проектные (эскизные) решения элементов системы (подземный водопровод, наземный сухотруб, водопитатель основной и автоматический, дозатор пенообразователя, емкости для запасов воды и пенообразователя, помещение пожарной насосной станции, пожарная автоматика, энергоснабжение насосно-силового оборудования и т. п.).

На уровне IV уточняют номенклатуру оборудования противопожарного водопровода (тип пожарного гидранта; размер и вид вышки для установки стационарного лафетного ствола; тип лафетного пожарного ствола; вид арматуры для включения и выключения подачи воды и водного раствора пенообразователей; размер и тип подземного водопроводного колодца и камеры; характеристику побудительной системы; вид оборудования водорошения; характеристики генераторов пены; вид пожарного извещателя и т. п.). На данном уровне ставят конкретные задачи по комплектованию того или иного узла в зависимости от специфических особенностей.

При анализе вариантов и моделировании решений возможны три подхода. Первый подход заключается в том, что процесс формирования структуры рассматривают как систему, содержащую множество операций (элементов системы), которые воздействуют друг на друга и ведут к достижению общей цели — разработке рациональной схемы. Второй подход к моделированию операций построения схемы основан на анализе, синтезе и оценке параметров системы. Третий подход заключается в том, что при анализе рациональной схемы особое внимание уделяют ее структуре с учетом специфического характера варианта решения. При построении варианта схемы решения учитывают опыт проектирования аналогичных объектов; материально-технические возможности для возведения разрабатываемой системы; информацию о работе существующих конструктивных элементах системы; экономические условия и производственные возможности объекта водоснабжения.

Создание технического решения включает следующие этапы работы:

идею создания нового технического решения и формулирование основных функций системы водоснабжения;

разработку технического задания, включающего определение требований к проектированию системы и

установление необходимых параметров водопроводных сооружений;

разработку рекомендаций по проектированию водопроводных сооружений и оборудования противопожарных водопроводов;

технологическое решение (построение принципиальной схемы, определение структуры системы, установление слагаемых комплексного показателя качества функционирования системы и определение его числовых значений) и оценку затрат на возведение и предстоящие издержки эксплуатации;

структурный анализ и синтез оптимальной структуры;

определение показателя эффективности выбранного варианта решения (путем сравнения показателей эффективности нового и базового варианта решений);

экспериментальное проектирование и строительство системы;

опытную эксплуатацию с целью выявления и устранения наиболее слабых мест, определяющих неэкономичность и низкую эффективность системы

### **Глава 3. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КОММУНАЛЬНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

При проектировании системы водоснабжения прежде всего необходимо определить требуемое количество и режим расходования воды потребителями. Многофункциональные системы водоснабжения обеспечивают различных потребителей, расходующих воду на разнообразные нужды. От того, насколько точно определены расходы воды потребителями, насколько режим расчетного потребления воды приближен к фактическому, во многом зависит качество функционирования системы водоснабжения и входящих в нее водопроводных сооружений. Основными потребителями воды являются жители городов и населенных пунктов, а также рабочие во время пребывания их на работе. Ниже рассмотрены методы определения расчетных расходов воды.

## 1 РЕЖИМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЙ

### Суточные объемы водопотребления населенных мест

Расход воды, потребляемой в сутки на хозяйственно-питьевые и бытовые нужды города или поселка в целом, рассчитывают по формуле

$$S = \sum_{i=1}^n \bar{q}_i N_i,$$

где  $S$  — суточный расход воды  $\text{м}^3 \text{сут}^{-1}$ ;  $\bar{q}_i$  — средний (за год) расход воды на одного жителя в  $i$ -м микрорайоне,  $\text{л} \cdot \text{сут}^{-1}$ , принимаемый по нормам [4],  $N_i$  — расчетное число жителей в  $i$ -м микрорайоне с учетом ожидаемой перспективы развития населения, тыс чел,  $n$  — число микрорайонов города, отличающихся между собой уровнем санитарно-технического благоустройства

Среднесуточный расход воды служит отправной точкой определения расчетного расхода, который должен удовлетворить потребность населения в любое время года, месяца, недели, включая сутки наибольшего водопотребления.

### Режим потребления воды населением

Параметры водопроводных сооружений систем водоснабжения городов и населенных мест рассчитывают на определенный расчетный период, который может включать несколько очередей строительства, учитывающих перспективу развития города и повышение уровня благоустройства потребителей воды. Расход воды, на пропуск которого рассчитывают элементы системы водоснабжения, изменяется в течение кварталов года, месяцев сезона, часов суток и минут часа. Эти колебания водопотребления необходимо учитывать при проектировании системы водоснабжения и водопроводных сооружений. Изменение потребления воды по годам обусловлено увеличением численности населения и повышением уровня благоустройства. Рост численности населения и увеличение норм водопотребления поддаются прогнозу, характеристики которого получают на основании обработки статистической информации о работе действующих систем водоснабжения. Данные о прогнозе развития города учитывают в процессе проектирования новых систем водоснабжения путем резервирования до-

полнительных площадей для развития тех или иных элементов, предусмотренных очередностью строительства. Сезонные изменения водопотребления определяют главным образом миграция населения и климатические факторы, характерные для заданного места расположения города. Летом население ряда городов уменьшается в связи с отъездом за город, на отдых, и водопотребление снижается. В других городах, главным образом курортных, численность населения летом значительно возрастает, что приводит к резкому увеличению водопотребления.

Параметры водопроводных сооружений системы водоснабжения рассчитывают таким образом, чтобы удовлетворить потребности населения в воде в период сезонных пиков. При подборе насосного оборудования и особенно при технико-экономическом расчете водоводов и водопроводных сетей учитывают кратковременность периодов максимального водопотребления.

Суточные и часовые колебания расходов воды являются результатом неравномерности потребления воды в городе. Неравномерность потребления воды в дни недели обусловлена укладом жизни города и связана, главным образом, с чередованием рабочих и нерабочих дней и в значительной мере зависит от производственного профиля города или населенного места.

В городах, большая часть населения которых имеет выходные в субботу и воскресенье, суточное водопотребление изменяется весьма значительно. При выходных по «скользящему» графику разница в расходах воды по дням недели сглаживается. Параметры водопроводных сооружений системы водоснабжения должны иметь достаточную производительность для гарантированной подачи воды в сутки «максимального водопотребления». При этом допускается форсированный режим работы — повышенные скорости движения воды в трубах водопроводных сетей, выход насосов из зоны оптимальных значений коэффициентов полезного действия, повышенный расход реагентов на очистных сооружениях и т. п.

Форсированный режим работы системы в сутки максимального водопотребления оправдывается тем, что в сутки среднего водопотребления, составляющие значительную часть работы водопроводных сооружений, они находятся в оптимальном режиме эксплуатации.

В наибольшей мере на режиме работы системы отражается часовая неравномерность водопотребления. Колебания часовой неравномерности трудно оценить какими-либо параметрами. В большинстве случаев процесс отбора воды потребителями характеризуется множеством не поддающихся учету факторов, часто носящих случайный характер. В то же время имеется вполне определенная общая закономерность возрастания расходов воды в дневные часы и уменьшения их ночью. Практика показывает, что амплитуда этих случайных изменений водопотребления зависит от числа водопотребителей — уменьшается с его возрастанием.

Для выполнения расчетов параметров водопроводных сооружений систем водоснабжения с учетом неравномерности водопотребления в СНиПе даны среднесуточные за год нормы хозяйственно-питьевого водопотребления и приведены значения суточного и часового коэффициентов неравномерности.

Нормативные указания, основанные на анализе фактической работы систем городского водоснабжения, позволяют определять величины расчетных суточных расходов воды в сутки наибольшего  $S_{\text{макс}}$  и наименьшего  $S_{\text{мин}}$  водопотребления. Величина  $S_{\text{макс}}$  является основным расчетным параметром для расчета системы водоснабжения и ее сооружений.

Режим работы систем подачи воды должен учитывать характер потребления воды в течение суток, т. е. колебания отборов воды в отдельные часы суток. Процесс отбора воды потребителями является случайным и неуправляемым, зависящим от влияния многих факторов (санитарно-технического оборудования жилищ, графиков работы учреждений и предприятий, изменений погоды и т. д.). Вследствие этого представление о режиме водопотребления можно получить только исходя из результатов анализа фактического режима водопотребления в городах с условиями жизни, близкими к условиям жизни города, для которого проектируют систему водоснабжения.

На основе анализа статистических данных об эксплуатации городских водопроводов СНиП даны рекомендации для определения наибольшего часового  $Q_{\text{макс}}$  и наименьшего часового  $Q_{\text{мин}}$  расходов воды. Расходы  $Q_{\text{макс}}$  и  $Q_{\text{мин}}$  на хозяйственно-питьевые нужды населения рассчитывают по формулам:

**Таблица 10. Потребители воды на хозяйственно-питьевые нужды и души на промышленных предприятиях**

Потребители воды	Расход воды, % максимального суточного расхода, по периодам водопотребления		
	максимального	среднего	минимального
Поливка и мойка покрытий проездов и площадей, поливка зеленых насаждений	0	20—50	50—80
Хозяйственно-питьевые нужды и души на промышленных предприятиях	20—40	30—50	10—50

для суток наибольшего водопотребления **максимальный** часовой расход

$$Q_{\text{макс}} = a_{\text{макс}} S_{\text{макс}} / 24,$$

**минимальный** часовой расход в те же сутки

$$Q_{\text{мин}} = a_{\text{мин}} S_{\text{макс}} / 24,$$

где  $a_{\text{макс}}$  и  $a_{\text{мин}}$  — коэффициенты неравномерности часового водопотребления в течение суток.

Расход в час наименьшего водопотребления суток определяют по формуле

$$Q^*_{\text{мин}} = a_{\text{мин}} S_{\text{мин}} / 24.$$

Значения коэффициентов  $a_{\text{макс}}$  и  $a_{\text{мин}}$  определяют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} a_{\text{макс}} &= \alpha_{\text{макс}} \beta_{\text{макс}}; \\ a_{\text{мин}} &= \alpha_{\text{мин}} \beta_{\text{мин}}; \end{aligned} \right\}$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий степень благоустройства зданий, режим работы предприятий и другие местные условия,  $\beta$  — коэффициент, учитывающий количество жителей в населенном пункте

Требования СНиП рекомендуют следующие численные значения коэффициентов  $\alpha$ :  $\alpha_{\text{макс}} = 1,2 \dots 1,4$  и  $\alpha_{\text{мин}} = 0,4 \dots 0,6$ .

Коэффициент  $\beta$  следует принимать в зависимости от числа жителей.

Число жителей,

тыс. чел. . . . . .	1,5	4	10	20	30	100	300	1000
$\beta_{\text{макс}}$ . . . . .	1,8	1,5	1,3	1,2	1,15	1,1	1,03	1
$\beta_{\text{мин}}$ . . . . .	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,83	1

К расходам воды  $Q_{\text{макс}}$  и  $Q_{\text{мин}}$  на хозяйственно-питьевые нужды населения добавляют расходы воды на поливку и мойку поездов и площадей и на поливку городских зеленых насаждений (табл. 10).



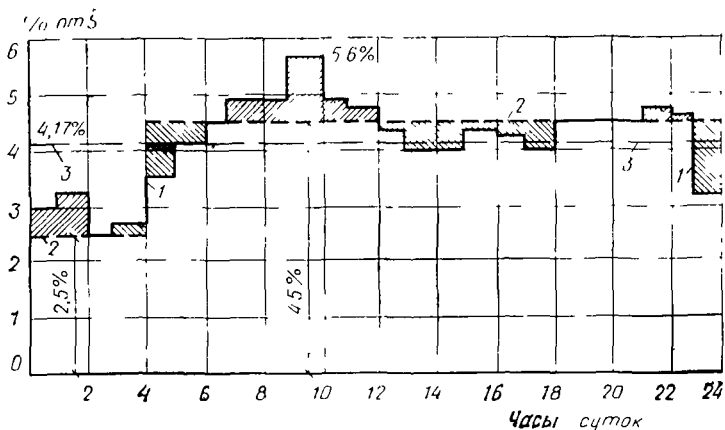


Рис. 4 График подачи и потребления воды по часам суток  
 1 — потребление воды, 2 — подача воды; 3 — среднесуточное потребление воды

### График потребления воды населением

Для определения параметров водопроводных сооружений системы необходимо знать динамику отбора воды потребителями в течение суток. Подобные графики режима водопотребления составляют на основании информации о действующих системах, близких к проектируемой системе по условиям климата, численности населения, степени благоустройства. Это дает возможность получить предельные расчетные часовые расходы для суток наибольшего и наименьшего водопотребления —  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$ .

Графики расхода воды по часам представляют собой ступенчатые диаграммы, в которых расход воды в пределах каждого часа предполагается постоянным, а возможные изменения отборов воды в пределах часа не учитываются. Такое допущение не вызовет существенных нарушений водообеспечения потребителей, так как в расчетный период до ее очередного расширения все сооружения системы имеют резерв для увеличения подачи воды. Кроме того, водопроводные сооружения обладают определенной гибкостью и резервами производительности. Примеры графиков водопотребления по часам суток приведены на рис. 4 и в табл. 11.

Если система водоснабжения подает воду предприятиям, расположенным в городе, графики отборов

Таблица 11. Колебания часового расхода воды по часам суток

Часы суток	Часовой расход, % суточного при		Часы суток	Часовой расход, % суточного при	
	$a=1,35$	$a=1,25$		$a=1,75$	$a=1,25$
0—1	3	3,35	12—13	4,4	4,6
1—2	3,2	3,25	13—14	4,1	4,55
2—3	2,5	3,3	14—15	4,1	4,75
3—4	2,6	3,2	15—16	4,4	4,7
4—5	3,5	3,25	16—17	4,3	4,65
5—6	4,1	3,4	17—18	4,1	4,35
6—7	4,5	3,85	18—19	4,5	4,4
7—8	4,9	4,45	19—20	4,5	4,3
8—9	4,9	5,2	20—21	4,5	4,3
9—10	5,6	5,05	21—22	4,8	4,2
10—11	4,9	4,85	22—23	4,6	3,75
11—12	4,7	4,6	23—24	3,3	3,7

воды следует сложить с графиками хозяйственно-питьевого водопотребления. В большинстве случаев крупные промышленные объекты расходуют воду сравнительно равномерно в течение суток. Изменения расходов используемой воды обычно носят сезонный характер

Следует отметить, что графики водопотребления в пределах суток отражают различные события, происходящие в городе, например в периоды интересных спортивных соревнований, радио- и телепередач потребление воды резко падает. Графики потребления воды в праздничные и предпраздничные дни отличаются от графиков потребления воды в будние дни и т. д.

### Режим взаимодействия работы сооружений

После того как выбрана структурная схема водоснабжения города, т. е. состав, виды и взаимное расположение основных сооружений, определены расчетные суточные расходы воды  $S_{ср}$  и  $S_{макс}$ , задан график водопотребления в течение суток, устанавливают режим работы сооружений с учетом их взаимодействия и взаимосвязи. Система водоснабжения должна удовлетворять требованиям потребителей к объему и режиму снабжения их водой.

Взаимосвязь в работе отдельных сооружений системы водоснабжения города показана на рис. 3. В систе-

му входят водоисточник с водозаборными сооружениями и напорно-регулирующая емкость (башня), расположенная в точке примыкания водоводов к сети. График изменения часовых расходов воды в пределах суток наибольшего водопотребления  $S_{\text{макс}}$  приведен на рис. 4

Воду в систему подают насосные станции НС-I и НС-II. Станция первого подъема НС-I подает суточный расход (в том числе  $S_{\text{макс}}$ ) из природного источника на очистные сооружения. Режим работы водозабора, насосной НС-I и станции очистки воды обычно принимается равномерным в течение суток. В соответствии с этой нагрузкой определяют производительность и мощность сооружений, а также величину сброса в резервуар чистой воды.

Из резервуара очищенная вода насосами станции второго подъема НС-II подается по водоводам в водопроводную сеть. При этом режим подачи воды должен приближаться к графику водопотребления. Поэтому график работы станции НС-II обычно принимают ступенчатым. Резервуар чистой воды является первой «регулирующей емкостью», на границе с различными режимами работы системы. Второй регулирующей емкостью является водонапорная башня (или напорный резервуар). В отдельные часы суток подача воды насосной станцией второго подъема может быть больше или меньше отбора воды по графику водопотребления. В этом случае избыток поданной воды поступает в бак водонапорной башни или, наоборот, — из водопроводной сети отбирается вода от НС-II и башни. Водопроводная сеть подает воду к водоразборным устройствам, из которых потребители забирают воду. В рассматриваемом случае на насосной станции второго подъема установлены два насосных агрегата (не считая запасных). Первый работает с 0 до 4 ч, подавая за 1 ч 2,5 % суточного расхода воды (максимального), второй насос вступает в работу в 4 ч и действует вместе с первым до 24 ч. Оба насоса подают за 1 ч работы 4,5 % суточного расхода. График работы насосной станции представлен на рис. 4 пунктирной линией. За сутки насосы подают количество воды, какое расходуется городом:  $(2,5 \cdot 4) + (4,5 \cdot 20) = 100 \%$ . В отдельные часы суток подача насосов больше или меньше потребления воды. Из графиков подачи и потребления воды легко уяснить роль во-

донапорной башни. В часы, когда подача насосов превышает потребление (например, от 4 до 6 ч), избыток воды подается в башню. Центробежные насосы при любом графике водопотребления могут подавать воду в сеть, не имеющую башен или резервуаров. Использование безбашенных систем оказывается экономичным только при относительно небольших значениях коэффициента часовой неравномерности расхода воды. Для определения параметров элементов системы водоснабжения необходимо уяснить связь не только между расходами, но и между напорами, создаваемыми в системе.

Насосные станции должны подавать воду потребителю под требуемым напором. Разбор воды большинством потребителей происходит на некоторой высоте над поверхностью земли, поэтому в водопроводной сети должно быть давление, достаточное для подъема воды до наивысшей водоразборной точки и ее излива, а также для преодоления сопротивлений, встречающихся на ее пути.

Пьезометрическую высоту  $H_{св}$ , необходимую для нормальной работы водопровода, или «свободный напор» в водопроводной сети определяют по формуле

$$H_{св} = H_0 + h_{п} + h,$$

где  $H_0$  — геометрическая высота расположения наивысшей водоразборной точки над поверхностью земли,  $h_{п}$  — напор у водоразборных приборов,  $h$  — потери напора от точки городской сети до водоразборной точки внутри здания

Для городского водопровода величину  $H_{св}$  принимают в зависимости от этажности их застройки: при одноэтажной застройке  $H_{св} = 10$  м; при большей этажности — плюс 4 м на каждый следующий этаж (в часы минимального водопотребления — плюс 3 м на этаж). Во всех точках водопроводной сети при работе водопровода (при отсутствии пожара) должен быть обеспечен напор не меньше указанных значений  $H_{св}$ .

На рис. 5 приведена расчетная схема для определения пьезометрических линий. Неблагоприятными по располагаемому напору оказываются точки, наиболее удаленные от башни и имеющие высокие геодезические отметки. В этих точках самые низкие свободные напоры.

Для определения расчетного напора, который необходимо создать в начале сети, выбирают «критические» точки сети, неблагоприятные как в отношении их геодезических отметок, так и удаленности от источника пи-

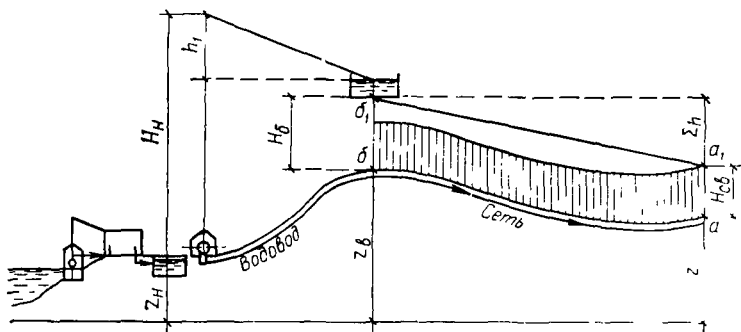


Рис 5 Расчетная схема для определения пьезометрических линий

тания. На рис. 5 критической будет точка а (с отметкой  $z$ ), наиболее возвышенная из конечных точек сети. Отложив в этой точке требуемый свободный напор  $H_{св}$ , получим расчетную пьезометрическую высоту для критической точки сети  $z + H_{св}$ . Необходимая величина  $H_{св}$  должна быть обеспечена в точке а в любой момент работы сети, включая максимальный водоразбор, при котором потери напора  $\Sigma h$  на всех участках от башни до критической точки сети будут иметь максимальную величину. Пьезометрическая линия, характеризующая падение напора в сети в часы максимального водоразбора, представлена на рис. 5 линией  $\delta_1 a_1$ . В точке б должен быть создан такой напор  $H_б$ , чтобы при максимальном уклоне пьезометрической линии напор в точке а не падал ниже заданного  $H_{св}$ . Таким образом, высоту расположения дна бака башни над поверхностью земли определяют из выражения

$$H_б = H_{св} + \Sigma h - (z_б - z).$$

Напор насосов для подачи воды определяют по формуле

$$H_н = (z_б - z_н) + (H_б + H_0) + h_в,$$

где  $z_б$  — отметка осн насосов,  $H_б$  — расчетная высота бака башни

## 2 ПОДАЧА ВОДЫ К МЕСТУ ПОЖАРА

Воду из водопровода отбирают через пожарный гидрант передвижными пожарными автонасосами или мотопомпами (рис. 6). При отсутствии водопровода с до-

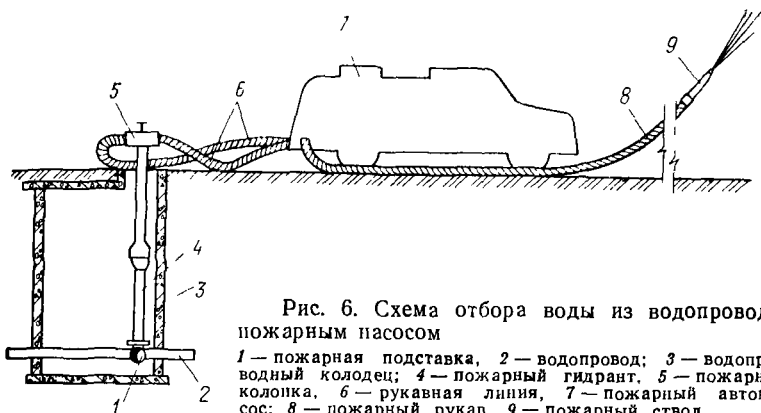


Рис. 6. Схема отбора воды из водопровода пожарным насосом

1 — пожарная подставка, 2 — водопровод; 3 — водопроводный колодец; 4 — пожарный гидрант, 5 — пожарная колонка, 6 — рукавная линия, 7 — пожарный автонасос; 8 — пожарный рукав, 9 — пожарный ствол

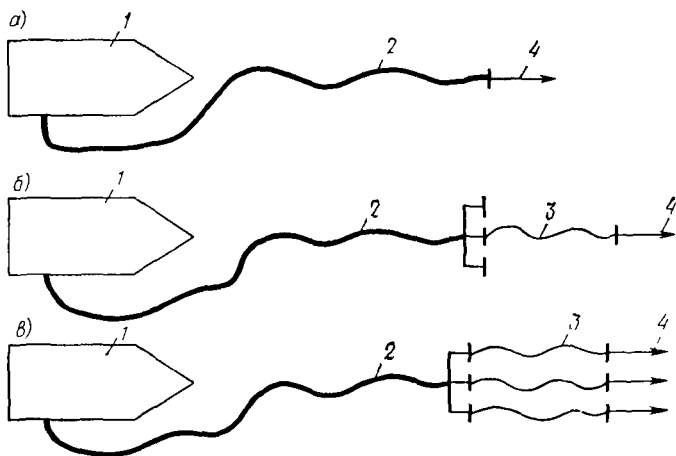


Рис. 7. Виды насосно рукавных систем

а — простейшее соединение, б — последовательное соединение, в — смешанное соединение, 1 — насос, 2 — магистральная рукавная линия, 3 — рабочая рукавная линия, 4 — пожарный ствол

статочным для тушения пожара расходом воду забирают передвижными пожарными насосами из естественных (реки, озера, пруды и т. п.) и искусственных водоемов (резервуары, копани и т. д.). Для нормальной работы передвижных пожарных насосов к водоемам устраивают специальные подъезды и пирсы. Для подачи воды во время пожара предусматривают прокладку насосно-рукавных систем. Выбор того или иного вида насосно-

рукавных систем диктуется характеристикой водопровода (водоотдачей, удаленностью гидранта от очага пожара), характером развития пожара и рядом других показателей, определяющих тактические схемы развертывания техники. Если тушение пожара возможно при подаче небольшого расхода воды, то от передвижного пожарного насоса прокладывают одну рукавную линию. Такой вид насосно-рукавной системы называется простейшим соединением (рис. 7). Если для тушения пожара воды, содержащейся в автоцистерне пожарного автомобиля, недостаточно, то от передвижного пожарного насоса прокладывают магистральную рукавную линию до места пожара и к ней подсоединяют рабочие рукавные линии. Если к магистральной рукавной линии подсоединена одна рабочая рукавная линия (см. рис. 7, б), то такой вид насосно-рукавной системы называется последовательным соединением. Если к магистральной рукавной линии подсоединяется несколько рабочих рукавных линий (см. рис. 7), то такой вид насосно-рукавной системы называется смешанным соединением.

Для борьбы с крупными пожарами применяют лафетные стволы. К таким стволам вода, как правило, подается одновременно по нескольким магистральным линиям (рис. 7). Такой вид насосно-рукавной системы называется параллельным соединением.

## Расчет насосно-рукавных систем

Расчет насосно-рукавных систем сводится к определению требуемого напора насоса в зависимости от расхода воды, подаваемой к месту пожара. Для определения этих параметров строится расчетная схема (рис. 8). Требуемый напор насоса определяют по формуле

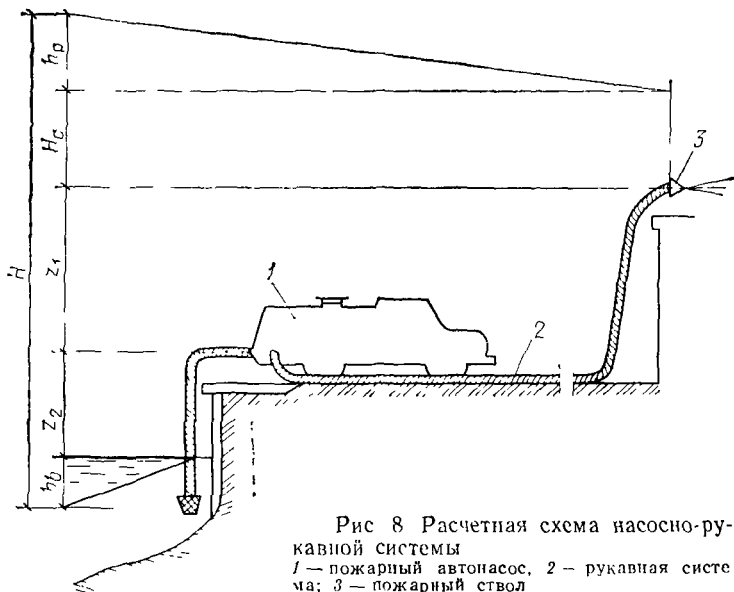
$$H = h_p + H_c + z_1 + z_2 + h_v,$$

где  $h_p$  — потери напора в рукавной системе;  $H_c$  — свободный напор перед стволом;  $z_1$  — высота подъема стволов над осью насоса;  $z_2$  — высота всасывания;  $h_v$  — потери напора во всасывающей линии.

Для практических расчетов напор насоса определяют по формуле

$$H = S_{\text{сист}} Q^2 + z, \quad (9)$$

где  $S_{\text{сист}}$  — сопротивление рукавной системы, зависящее от вида рукавной системы и диаметра установленных на ней пожарных стволов,  $Q$  — расчетный расход воды;  $z$  — высота подъема пожарных стволов над осью насоса



Гидравлические расчеты насосно-рукавных систем сводят к решению трех основных задач.

1. Определение напора насоса, если заданы расчетный расход воды (напор перед пожарным стволом), вид насосно-рукавной системы, а также длина и диаметр рукавов.

2. Определение расхода воды по заданному напору насоса.

3. Определение предельной длины насосно-рукавной системы по расчетному расходу воды и напору насоса.

1. Определение напора насоса. Требуемый напор насоса определяют по формуле (9). Для рукавного соединения (рис. 7, а), состоящего из одного рукава, сопротивление системы вычисляют по формуле

$$S_{\text{сист}} = s_0 + s_c,$$

где  $s_0$  — сопротивление рукавной линии;  $s_c$  — сопротивление ствола

При последовательном соединении рукавов (см. рис. 7, б) расход воды в любой точке линии будет одинаковым, а общее сопротивление соединения равно сумме сопротивлений всех включенных в соединение рукавов.



При последовательном соединении равноценных рукавов общее сопротивление определяют по формуле

$$S_{\text{общ}} \approx nS_0,$$

а сопротивление рукавной системы

$$S_{\text{сист}} = S_{\text{общ}} + S_c = nS_0 + S_c, \quad (10)$$

где  $n$  — число рукавов в соединении.

При параллельном соединении рукавных линий (см. рис. 7, в) общее количество воды, протекающее каждую секунду через каждое из рукавных ответвлений, равно расходу системы до разветвления рукавного соединения.

При параллельном соединении равноценных ( $s_1 = s_2 = s_3 = \dots = s_n$ ) рукавных линий общее сопротивление будет равно

$$S_{\text{общ}} = s/k^2 = nS_0/k^2,$$

где  $s$  — сопротивление одной линии,  $k$  — число линий в параллельном соединении;  $S_0$  — сопротивление одного рукава;  $n$  — число рукавов в каждой линии.

Сопротивление системы, состоящей из рабочих рукавных линий с пожарными стволами, определяют по формуле

$$S_{\text{сист}} = S_{\text{общ}} + S_c = n_p s_p / k^2 + S_c. \quad (11)$$

Рассмотрим смешанную систему (см. рис. 7, в) с тремя пожарными стволами, вода к которым подается от насоса по магистральной линии и разветвлению на три рабочие рукавные линии. Сопротивления отдельных рабочих линий со стволами определяют по правилу последовательного соединения, т. е.  $s_p = s + s_c$  ( $s_p$  — сопротивление рабочей рукавной линии,  $s_c$  — сопротивление ствола).

В практике пожаротушения чаще используют одинаковые пожарные стволы и рабочие линии, поэтому напор перед стволами одинаков и равен  $H_c$ , общее сопротивление рабочих рукавных линий, которое вычисляют по правилу параллельных соединений, будет равно

$$s_p = s'/k^2.$$

Таким образом, общее сопротивление смешанной системы соединения рукавов с разветвлением на три рабочие линии будет равно

$$S_{\text{сист}} = s_n + s_p + S_c/9.$$

Когда в разветвлении используют несколько рабочих линий  $k$  и несколько магистральных линий  $\epsilon$ , общее сопротивление смешанной системы соединения рукавных линий будет

$$S_{\text{сист}} = s_m/\epsilon^2 + s_p + s_c/k^2,$$

где  $s_m$  — сопротивление магистральной рукавной линии;  $s_p$  — сопротивление одного ответвления рабочей линии.

При смешанном соединении рукавных линий (см. рис. 7, в) общее сопротивление рукавной системы определяют по формуле

$$S_{\text{сист}} = s_m^0 n_m / \epsilon^2 + s_p^0 n_p + s_c / k^2, \quad (12)$$

где  $s_m^0 n_m / \epsilon^2$  — сопротивление магистральной линии ( $s_m^0$  — сопротивление одного рукава,  $n_m$  — число рукавов в магистральной линии,  $\epsilon$  — число линий);  $s_p^0 n_p / k^2$  — сопротивление рабочей линии ( $s_p^0$  — сопротивление одного рукава;  $n_p$  — число рукавов в каждой из рабочих линий,  $k$  — число линий рабочих рукавов, равное числу пожарных стволов).

Напор насоса для смешанного соединения рукавных линий устанавливают по формуле

$$H = s_c (Q/k)^2 + s_p^0 n_p (Q/k)^2 + s_m^0 n_m (Q/\epsilon)^2 + z,$$

где  $s_c (Q/k)^2$  — напор ствола,  $m$  ( $s_c$  — сопротивление ствола),  $s_m^0 n_m (Q/\epsilon)^2$  — потери напора в магистральной линии,  $m$  ( $s_m^0$  — сопротивление одного рукава магистральной линии);  $s_p^0 n_p (Q/k)^2$  — потери напора в одной из рабочих линий,  $m$  ( $s_p^0$  — сопротивление одного рукава рабочей линии),  $z$  — высота подъема стволов над осью насоса,  $m$ ;  $k$  и  $\epsilon$  — число рабочих и магистральных линий;  $n_m$  и  $n_p$  — число рукавов в одной из магистральных линий и одной из рабочих линий;  $Q$  — расход воды в насосно-рукавной системе, равный сумме произвольностей стволов,  $л/с$

Все приведенные расчеты насосно-рукавных систем справедливы при условии, если  $H_{\text{н}} \geq H$  ( $H_{\text{н}}$  — напор насоса) при расчетных значениях расхода воды  $Q$ .

2 Определение расхода воды по заданному напору. При определении расхода воды учитывают характеристику рукавной системы и рабочий режим насоса. Задачи о совместной работе насосов и рукавных систем решают графически и аналитически. При аналитическом решении задач о совместной работе насоса с рукавной системой используют уравнение, характеризующее параметры насоса, и уравнение (9), характеризующее параметры рукавной системы

$$a - vQ^2 = S_{\text{сист}} Q^2 + z \quad (13)$$

Для расчета расхода воды, подаваемой насосно-рукавной системой, из уравнения (13) получим формулу

$$Q = \sqrt{(a - z) / (S_{\text{сист}} + v)}.$$

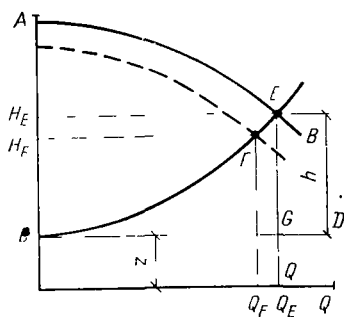


Рис 9 Характеристика режима работы насосно рукавной системы

параллельно оси расходов  $Q$ . Из точки  $Q_E$ , соответствующей величине расчетного расхода воды в рукавной системе, проводят прямую  $QE$  параллельно оси напоров до пересечения с рабочей характеристикой насоса  $AB$ . Точка пересечения (точка  $E$ ) характеризует рабочий режим насоса: подачу  $Q_E$  и напор  $H_E$ . Отрезок прямой  $EQ$  представляет величину общих потерь напора в рукавной системе. Подставив значение  $S_{\text{сист}}$ , рассчитанное по формуле (10), в выражение (9) и решив уравнение относительно  $n$ , определим предельное число рукавов для простейшего вида рукавного соединения

$$n = [(H - z) / Q^2 - s_c] / s^p_0$$

Подставив значение  $S_{\text{сист}}$ , подсчитанное по формуле (12), в выражение (9) и решив уравнение относительно  $n_m$ , определим предельное число рукавов в магистральной рукавной линии для смешанного соединения рукавной системы:

$$n_m = [(H - z) / Q^2 - (s_c + n_p s^p_0) / k^2] / s^m_0 / \varepsilon^2$$

Предельное расстояние от пожарного автонасоса до места пожаротушения находят по формуле

$$L = 20(n_m + n_p).$$

### Перекачка воды автонасосами

При удаленном водистоичнике используют перекачку воды по рукавным линиям несколькими пожарными насосами, включенными последовательно. При перекачке воды первый насос подает воду во всасывающий патру-

3. Определение предельной длины рукавной системы. Задачу определения предельной длины рукавной системы решают графически и аналитически, если заданы расчетный расход  $Q$  и высота подъема стволов  $z$ . При графическом решении задачи строят характеристику  $Q - H$  насоса (кривая  $AB$  рис. 9).

На расстоянии величины  $z$ , равной высоте подъема стволов, проводят прямую  $CD$

параллельно оси напоров  $H$ . Из точки  $Q_E$ , соответствующей величине расчетного расхода воды в рукавной системе, проводят прямую  $QE$  параллельно оси расходов  $Q$  до пересечения с рабочей характеристикой насоса  $AB$ . Точка пересечения (точка  $E$ ) характеризует рабочий режим насоса: подачу  $Q_E$  и напор  $H_E$ . Отрезок прямой  $EQ$  представляет величину общих потерь напора в рукавной системе. Подставив значение  $S_{\text{сист}}$ , рассчитанное по формуле (10), в выражение (9) и решив уравнение относительно  $n$ , определим предельное число рукавов для простейшего вида рукавного соединения

Подставив значение  $S_{\text{сист}}$ , подсчитанное по формуле (12), в выражение (9) и решив уравнение относительно  $n_m$ , определим предельное число рукавов в магистральной рукавной линии для смешанного соединения рукавной системы:

Предельное расстояние от пожарного автонасоса до места пожаротушения находят по формуле

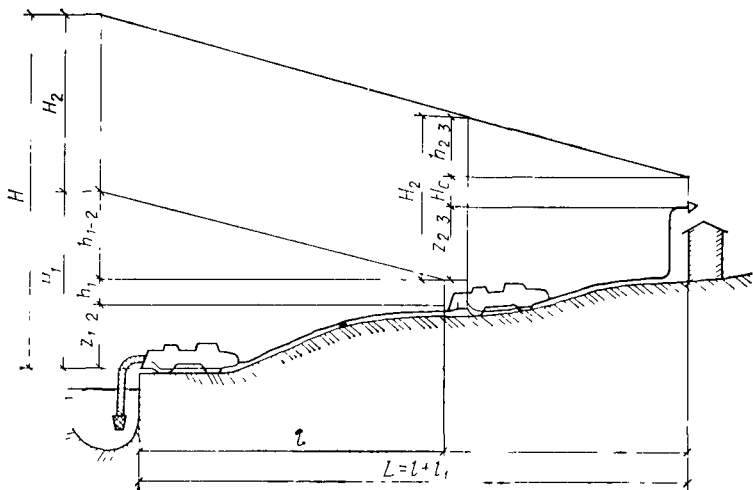


Рис. 10 Расчетная схема для определения гидравлических параметров насосно-рукавной системы при перекачке воды последовательно включенными пожарными насосами

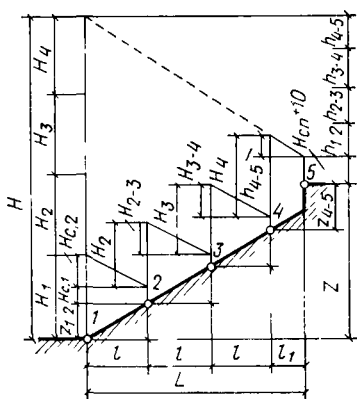


Рис. 11. Расчетная схема для определения числа насосов, работающих вперекатку  
1, 2, 3, 4, 5 — насосы

бок второго насоса, а последний подает воду в напорную рукавную линию с пожарными стволами (рис. 10). Для бесперебойной работы системы в конце каждой ступени перекачки (у всасывающего патрубка последующего насоса) должен быть свободный напор  $h_1$ , равный 10 м. В конечной ступени перекачки (у пожарного ствола) величину  $H_c$  принимают равной напору для создания требуемого расхода воды через пожарный ствол. Таким образом, напор каждого насоса в системе перекачки складывается из высоты подъема одного насоса над другим  $z$ , свободного напора  $h$  (или  $H_c$  в конце сис-

темы перекачки) и потерь напора в рукавных системах  $h_{1-2}$ ,  $h_{2-3}$  и т. д. При решении практических задач определяют число пожарных насосов, работающих вперекачку, и предельные расстояния между ними. Рассмотрим последовательную работу двух одинаковых пожарных автонасосов (см. рис. 10).

Расстояние между водонсточником и местом пожара обозначим через  $L$  (рис. 11), а расстояние между автонасосами по линии перекачки — через  $l$ , тогда

$$L = ml + l_1 = (x - 1)l + l_1,$$

где  $m$  — число ступеней перекачки  $x$  — число автонасосов равное  $m + 1$

Число автонасосов в системе перекачки воды (при одинаковых насосах) определяют по формуле

$$x = H/H_1,$$

где  $H$  — требуемый напор,  $H_1$  — напор развиваемый одним насосом.

Требуемый напор для работы насосов вперекачку определяют по формуле

$$H = h + H_c + z,$$

где  $h$  — потери напора в рукавной линии,  $H_c$  — свободный напор на конце рукавной линии,  $m$ ;  $z$  — высота подъема пожарных стволов над уровнем водосточника.

Потери напора в рукавной линии системы перекачки  $h$  равны сумме потерь напора в каждой ступени перекачки

$$h = h_{1-2} + h_{2-3} + h_{3-4} + \dots + h_{(m-1)-m},$$

где  $h_{1-2}$  — потери напора в линии между первым и вторым насосами

Высоту подъема  $z$  представляют в виде равенства

$$z = z_{1-2} + z_{2-3} + z_{3-4} + \dots + z_{(m-1)-m},$$

где  $z_{1-2}$  — высота подъема насоса в первой ступени перекачки (индекс указывает номер насоса в системе перекачки)

В конечной ступени перекачки принимают высоту подъема пожарных стволов над осью последнего автонасоса.

Таким образом, для решения задачи должны быть заданы величина  $L$ , расчетный расход воды  $Q$  и высота подъема пожарных стволов  $z$ . Предельное число рукавов между соседними автонасосами при перекачке в одну линию определяют по формуле

$$\left. \begin{aligned} n_{1-2} &= h_{1-2}/S_0 Q^2; \\ n_{2-3} &= h_{2-3}/S_0 Q^2; \\ &\dots \dots \dots; \\ n_{(m-1)-m} &= h_{(m-1)-m}/S_0 Q^2, \end{aligned} \right\}$$

где  $n$  — число рукавов между соседними автонасосами,  $h_{1-2}$  — потери напора в рукавной линии между первым и вторым насосами,  $S_0$  — сопротивление одного рукава в линии между насосами;  $Q$  — расход воды.



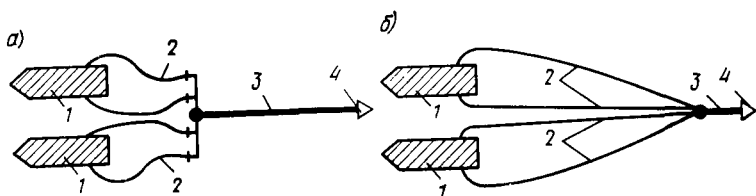


Рис. 12 Схема подачи воды в лафетный ствол

*a* — по общей магистральной линии; *б* — по самостоятельным рукавным линиям, 1 — насос, 2 — рабочая рукавная линия, 3 — магистральный рукав, 4 — лафетный ствол

При параллельной работе насосов на лафетный ствол приходится решать три задачи.

1. Определение числа пожарных автонасосов при заданной рукавной системе и производительности ствола

2. Определение наиболее рациональной рукавной системы при заданной производительности ствола и числе пожарных автонасосов.

3. Определение производительности лафетного ствола для заданной насосно-рукавной системы

1. Определение числа пожарных автонасосов. При параллельной работе пожарных насосов на лафетный ствол производительность лафетного ствола  $Q_{\text{ств}}$  должна быть меньше или равна сумме подачи насосов  $Q$ , т. е.  $Q_{\text{ств}} \leq \kappa Q$ .

Уравнение (13) совместной работы насосов с рукавной системой можно записать в виде

$$(a - \nu Q_{\text{ств}}^2) / \kappa^2 = S_{\text{сист}} Q_{\text{ств}}^2 + z \quad (17)$$

После преобразований уравнения (17) получим формулу для определения числа пожарных насосов, работающих на лафетный ствол:

$$\kappa = \sqrt{\nu / [(a - z) / Q_{\text{ств}}^2 - S_{\text{сист}}]}$$

2. Определение наиболее рациональной рукавной системы. Из уравнения (17) можно определить значение сопротивления системы

$$S_{\text{сист}} = (a - z) / Q_{\text{ств}}^2 - \nu / \kappa^2. \quad (18)$$

Путем сопоставления вариантов рукавных систем, сопротивления которых находят по формулам (15) и (16), выбирают систему с наименьшим числом рукавов. При этом значении величины  $S_{\text{сист}}$ , определенные по форму-

дам (15) и (16), должны быть меньше или равны значению  $S_{\text{сист}}$ , определенному по формуле (18).

3 Производительность ствола при заданной насосно-рукавной системе. Из уравнения (17) определяют производительность лафетного ствола для рукавной системы, имеющей сопротивление  $S_{\text{сист}}$

$$Q_{\text{ств}} = \sqrt{\frac{a - z}{S_{\text{сист}}/6x^2}}$$

### 3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОСТИ ПОДАЧИ ВОДЫ ПРИ ПОЖАРОТУШЕНИИ

Количество воды, отбираемой из водопровода для тушения пожаров, составляет в течение года незначительную часть повседневного хозяйственно-питьевого водопотребления  $Q_x$ . Во время пожара расход воды  $Q_{\text{п}}$  значительно увеличивается. Подающие и распределяющие воду сооружения системы водоснабжения должны иметь такие элементы (водопитатели, водоводы, водопроводные сети и емкости), которые подавали бы требуемое количество воды под соответствующим напором. На рис. 13 показана зависимость  $Q_{\text{п}}/Q_x$  от численности населения, из которой видно, что в небольших населенных местах с численностью населения до 10 тыс. чел. расходы воды для тушения пожаров превышают повседневные расходы воды на хозяйственно-питьевые нужды. Поэтому выполнение водопроводом функций противопожарной защиты требует определенных капитальных затрат, которые определяют по формуле

$$C = 92/x^{0,3} + 0,31 \text{ при } 5 \leq x \leq 500,$$

где  $C$  — капитальные затраты для достижения требований пожарной защиты, выраженные в процентах от общих затрат на систему водоснабжения,  $x$  — численность населения, тыс чел

### Трассировка водопроводной сети

Водопроводная сеть предназначена для распределения воды по территории города, промышленного предприятия, поселка и подачи ее потребителям. В водопроводную сеть вода подается водоводами. При работе системы не исключаются аварии в водоводе, которые могут привести к полному прекращению поступления воды в противопожарный водопровод, что недопустимо, поэтому водоводы прокладывают в несколько линий, и



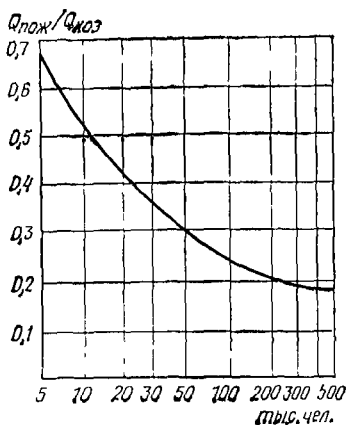


Рис 13 Зависимость  $Q_{пж}/Q_{жз}$  от численности населения

авария на одной линии приводит лишь к снижению подачи воды. Недопустимое снижение подачи воды предотвращают путем устройства перемычек, с помощью которых в момент аварии выключается не весь водовод, а лишь поврежденный участок. Необходимое число ниток водоводов и перемычек между ними рассчитывают исходя из условия, чтобы при аварии водовода во время пожаротушения подача воды не снижалась более чем на 30%. При устройстве переключений длину ре-

монтных участков водоводов в две линии и более принимают не более 5 км, а при одной линии — не более 3 км. В городах и поселках обычно устраивают единую наружную водопроводную сеть, распределяющую воду между всеми потребителями и одновременно позволяющую отбирать воду в случае пожара. Водопроводную сеть, как правило, прокладывают вдоль дорог, улиц и проездов, поэтому трассировка наружных водопроводных сетей тесно связана с планировкой объекта. Трассу сети хозяйственно-питьевого водопровода проводят по всем улицам, чтобы можно было присоединить к ней каждое здание. На промышленных предприятиях трассу сети прокладывают по кратчайшему направлению к основным сооружениям, отбирающим воду. Для удобства отбора воды из водопроводной сети на пожарные нужды расстояние между основными водопроводными линиями, на которых установлены пожарные гидранты, не должно превышать 200 м. Эти линии соединяются поперечными линиями (связками), укладываемыми на расстоянии не более 500 м друг от друга. Таким образом, водопроводная сеть, используемая для отбора воды на пожарные цели, представляет собой ряд связанных колец.

Водопроводные сети бывают: разветвленные (туликовые) (рис. 14, а), кольцевые с выраженными магистралями, по которым подается основное количество воды

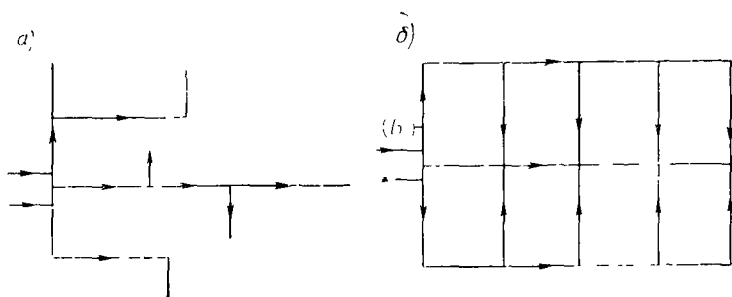


Рис 14 Трассировка водопроводной сети

а — разветвленная (тупиковая); б — кольцевая с выраженными магистралями

(рис. 14, б), и обезличенные кольцевые, в которых нет резко выраженных основных магистралей. Разветвленные (тупиковые) сети не рекомендуется использовать для распределения воды на пожарные нужды. Тупиковые сети водопровода разрешается применять на производственных водопроводах, допускающих перерыв в подаче воды во время ликвидации аварий; на хозяйственно-питьевых водопроводах при диаметре труб не более 100 мм; для пожарных водопроводов при длине линий не более 200 м (возможная длина рукавных линий, прокладываемых от пожарных автомобилей). Прокладка тупиковых линий в противопожарных водопроводах длиной более 200 м допускается лишь при условии устройства пожарных водосмонов и в исключительных случаях по согласованию с органами Государственного пожарного надзора.

В городах и на крупных объектах водопроводные линии подразделяются на магистральные (диаметром 300 мм и более) и распределительные линии (наименьший диаметр распределительных линий 100 мм). В крупных и развивающихся городах распределительные линии прокладываются диаметром 150—200 мм. Часто в водопроводных линиях бывает трудно выделить магистральные и распределительные линии. Такие сети называют обезличенными. Обезличенные кольцевые сети дороже, чем сети с выраженными магистралями. Применяются в поселках, на небольших промышленных предприятиях и т. п.

Наиболее целесообразны (по условиям надежной и бесперебойной подачи воды) для распределения воды

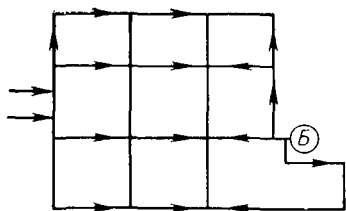


Рис. 15 Трассировка водопроводной сети при расположении водонапорной башни в конце сети

на пожарные нужды кольцевые водопроводные сети с магистралями и рационально устроенными связками между ними. Последние должны быть рассчитаны на пропуск количества воды в район, питаемый магистралью, потерпевшей аварию. Магистральные линии для надежности работы должны быть закольцованы.

На характер трассировки водопроводной сети существенное влияние оказывают принятая схема распределения воды в расчетном режиме системы водоснабжения, а также место расположения водонапорной башни или возвышенного резервуара (контррезервуар). В часы максимального водопотребления вода в водопроводную сеть поступает одновременно от насосной станции и из водонапорной башни (рис. 15) и наоборот, в часы минимального водопотребления водопроводная сеть не только распределяет воду между потребителями, но и транспортирует определенное количество воды для пополнения ее запаса в водонапорной башне или возвышенном резервуаре, израсходованного в часы максимального водоразбора или пожара.

Основные требования, предъявляемые к трассировке водопроводных путей, следующие:

водопроводные линии должны максимально охватывать потребителей, чтобы при распределении воды к устройствам для ее отбора не требовалось добавочной прокладки большого числа труб;

трассировка водопроводной сети должна иметь такое потокораспределение, при котором достигаются минимальные затраты на строительство, а также расходы на эксплуатацию и амортизацию;

трассировка водопроводной сети противопожарного назначения должна производиться с добавочными линиями, обеспечивающими надежность и бесперебойность подачи воды на тушение пожара в случае аварии отдельных линий сети;

трассировка водопроводной сети должна учитывать принятую систему водоснабжения и ее гидравлические параметры.

#### 4. УСТРОЙСТВО ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ











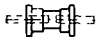

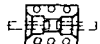

















Для водопроводной сети и водоводов применяют чугунные, стальные, асбестоцементные, бетонные и железобетонные трубы. Вид труб выбирают в зависимости от величины рабочего давления в водопроводе, условий укладки (в земле, каналах и т. п.), а также из экономических соображений.

Чугунные водопроводные трубы (ГОСТ 5525—75) имеют раструбное соединение (раструб одной трубы соединяется с «гладким концом» другой трубы). Трубы изготовляют длиной 2—5 м, внутренним диаметром 50—1000 мм и рассчитаны на внутреннее рабочее давление 1 МПа, усиленные трубы — 1,6 МПа. Чугунные водопроводные трубы предохраняют от коррозии методом асфальтирования внутри и снаружи. Стыковое соединение труб водонепроницаемое и имеет некоторую гибкость, допускающую незначительные деформации при просадках грунта по длине линии без нарушения прочности и герметичности стыка.

Оборудование и арматура водопроводных сетей крепится к трубам с помощью специальных фасонных частей. Некоторые виды фасонных частей (ГОСТ 5525—75 и ГОСТ 9583—75) и их условные обозначения приведены на рис. 16.

Пожарные гидранты устанавливают на сети с помощью специальных фасонных частей — подставок. Они представляют собой раструбные патрубки, тройники или кресты (см. рис. 16) с вертикальными фланцевыми отрезками диаметром 200 мм, предназначенными для установки пожарных гидрантов. Чугунные раструбные трубы используют при устройстве наружных водопроводных сетей. Недостатком чугунных труб являются плохая сопротивляемость динамическим нагрузкам и высокая металлоемкость по сравнению со стальными трубами. Чугунные трубы (в отличие от стальных) имеют еще один недостаток — в случае нарушения целостности трубы при аварии часто разрушаются крупные участки стенок трубы, что вызывает значительные утечки воды, особенно на линиях большого диаметра.

Стальные трубы (ГОСТ 10704—76 и ГОСТ 3262—75) применяют для строительства наружных водопроводных сетей и водоводов. Эти трубы изготовляют с гладкими концами и соединяют между собой сваркой. Промыш-

Эскиз	Условное обозначение на схеме	Наименование
		Переход раструбный
		" раструб-гладкий конец
		Трубка фланец-раструб
		" фланец-гладкий конец
		Двойной раструб
		Муфта подвижная
		" свертная
		Звездочка фланцевая
		Седелка фланцевая
		" с резьбой
		Пожарная подставка раструбная
		Тройник раструб-фланец с пожарной подставкой
		Тройник фланцевый с пожарной подставкой
		Крест фланец-раструб с пожарной подставкой
		Крест фланцевый с пожарной подставкой

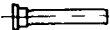





























Эскиз	Условное обозначение на схеме	Наименование
		Труба раструбная
		Тройник фланцевый
		" раструбный
		" раструб-фланец
		Крест фланцевый
		" раструбный
		" раструб-фланец
		Выпуск фланцевый
		" раструбный
		" раструб гладкий конец
		" раструб-фланец
		" раструб-фланец
		" раструб-фланец
		Переход фланцевый
		" раструб фланец

Рис 16. Фасонные части чугунных водопроводных труб (ГОСТ 9583—75) и их условные обозначения

ленностью выпускаются также спиральные сварные трубы, имеющие большую прочность при относительно малой толщине стенок. Стальные трубы используют в макропористых грунтах, в сейсмических районах, при устройстве переходов под железными и автомобильными дорогами, по мостам и эстакадам и при устройстве дюкеров, т. е. в условиях, где могут возникать большие динамические нагрузки и изгибающие усилия.

Стальные трубы по сравнению с чугунными выдерживают большее внутреннее давление, имеют меньшую толщину стенок. Большая длина стальных труб (по сравнению с чугунными) уменьшает число стыков и, следовательно, упрощает и удешевляет работы по монтажу водопроводных линий.

Внутренняя поверхность труб предохраняется от коррозии путем применения полимерных, цементных и других покрытий.

Асбестоцементные трубы (ГОСТ 539—80) изготавливают четырех марок: ВТ3; ВТ6, ВТ9; ВТ12 (на рабочие давления соответственно 0,3; 0,6; 0,9, 1,2 МПа) с условным проходом 50—500 мм. По сравнению с чугунными и стальными асбестоцементные трубы имеют ряд преимуществ: меньшую массу и подверженность коррозии, а также более гладкую внутреннюю поверхность. Однако асбестоцементные трубы хрупки. Соединения труб выполняют с помощью специальных муфт и резиновых колец. Оборудование водопроводной сети устанавливают на те же фасонные части, что и для чугунных труб.

Железобетонные трубы применяют в основном для строительства водоводов и в отдельных случаях для участков магистральной сети большого диаметра (500—1600 мм). Железобетонные трубы изготавливают методом вибропрессования по ГОСТ 12586—74 трех классов: I, II, III для расчетных давлений 1,5; 1 и 0,5 МПа.

Для устройства водопроводных сетей применяют и пластмассовые (полиэтиленовые) трубы (ГОСТ 18599—73). Такие трубы легки и гибки, имеют малую теплопроводность, не подвержены коррозии, имеют большой коэффициент линейного расширения, не разрушаются при замерзании воды. Пропускная способность пластмассовых труб на 20—25 % больше, чем стальных.

На водопроводной сети устанавливают задвижки, вантузы, выпуски (рис. 17, а, б, в), пожарные гидранты,

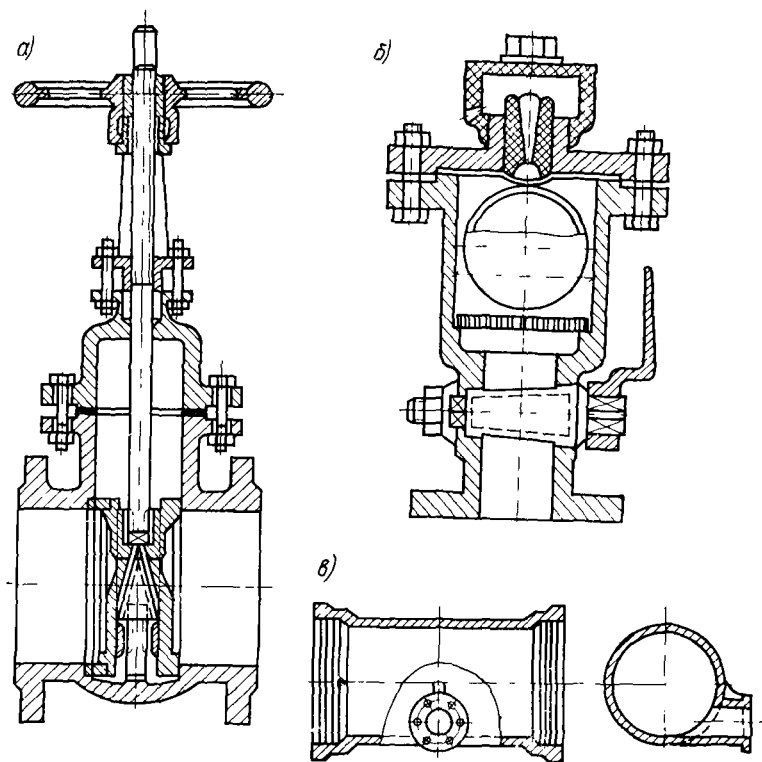


Рис 17 Арматура водопроводной сети  
 а — задвижка, б — вантуз, в - выпуск

предохранительные клапаны и т. п. Задвижки служат для отключения отдельных участков в сети при аварии на ней и для регулирования расходов воды по отдельным участкам. На водопроводах применяют задвижки с выдвижным или невыдвижным штоком, которые имеют ручной, электрифицированный или гидравлический привод. Промышленностью выпускаются задвижки с диаметром условного прохода 50—2000 мм. Для автоматического включения и выключения подачи воды используют электрифицированные задвижки. Для размещения задвижек увеличивают размер водопроводных колодцев (особенно по высоте).

Вантузы служат для выпуска и впуска воздуха в трубопроводы. Устанавливают их на возвышенных точ-



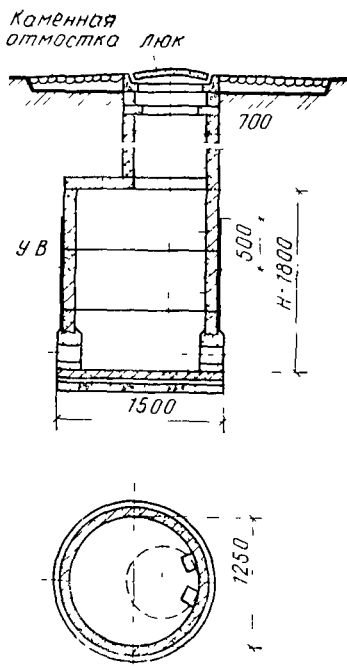


Рис 18 Водопроводный колодец

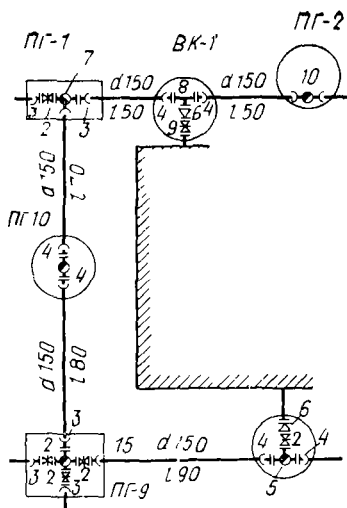


Рис 19 Деталировка участка водопроводной сети  
 ПГ — пожарный гидрант, ВК — водопроводный колодец 1 — крест фланцевый с пожарной подставкой,  $d=150$  мм 2 — задвижка  $d=150$  мм, 3 — патрубок — фланец — раструб  $d=150$  мм 4 — патрубок — фланец — гладкий конец  $d=150$  мм 5 — тройник фланцевый с пожарной подставкой  $d=150$  мм 6 — переход фланцевый 150/100 мм 7 — крест фланцевый — раструб с пожарной подставкой  $d=150$  мм, 8 — тройник фланцевый  $d=150$  мм, 9 — задвижка  $d=100$  мм, 10 — пожарная подставка раструбная  $d=150$  мм

ках профиля сети. Основной частью вантуза является плавающий шар. При скоплении воздуха в вантузе шар опускается и открывает отверстие для выпуска воздуха. Вантузы для впуска воздуха устанавливаются в случаях, когда имеется опасность образования вакуума или разрыва сплошности потока воды.

Выпуски предназначены для слива воды из водопроводной сети при ремонте участков: устанавливают их в наинизших точках профиля сети.

Для удобства осмотра, ухода и ремонта арматуру размещают в водопроводных колодцах (рис. 18), размер которых определяется диаметром трубопроводов, а также числом размещаемой арматуры. Колодцы строят из кирпича, железобетона и другого строительного ма-

териала. Колодец оборудуют скобами для спуска в него и горловиной с чугунным люком. Колодцы, устраиваемые в «мокрых» грунтах, имеют гидронизоляцию. Водопроводные колодцы круглой в плане формы собирают из сборных железобетонных колец.

Составной частью каждого проекта является детализировка водопроводной сети. Детализировкой сети называется схема сети с нанесением на нее арматуры, колодцев, фасонных частей и основных размеров (рис. 19). На основании детализировки сети составляют спецификацию — перечень числа труб каждого размера, задвижек, гидрантов и другой арматуры, тип и число фасонных частей, размер и число колодцев. Глубина заложения труб должна быть больше расчетной глубины промерзания грунта при диаметре труб 300 мм на 0,2 м, а при диаметре 600 мм на 0,5 м.

На промышленных предприятиях с большим числом коммуникаций водопроводные линии прокладывают в туннелях. В условиях Крайнего Севера и районах вечной мерзлоты тепловое воздействие трубопроводов на мерзлый грунт может вызвать оттаивание и деформацию грунта и привести к разрушению трубопровода, а также тех сооружений, которые расположены вблизи него. Поэтому в этих местах трубопроводы часто укладывают над землей на искусственное основание.

## Пожарные гидранты и колонки

Подземные и надземные пожарные гидранты предназначены для отбора воды из водопроводной сети на пожарные нужды.

Гидрант пожарный подземный (ГОСТ 8220—62) состоит из чугунного корпуса (рис. 20), затвора с клапаном обтекаемой формы, шпинделя, соединительной муфты, штанги и ниппеля, закрывающегося крышкой. Важной характеристикой гидранта является величина гидравлического удара, который возникает при открывании и закрывании гидранта. Для предотвращения гидравлических ударов в запорном узле гидранта расположен клапан обтекаемой формы, который исключает возможность появления срывной кавитации.

Подземные гидранты размещают в водопроводных колодцах (рис. 21) так, чтобы расстояние между ними не превышало 150 м и чтобы они были расположены не

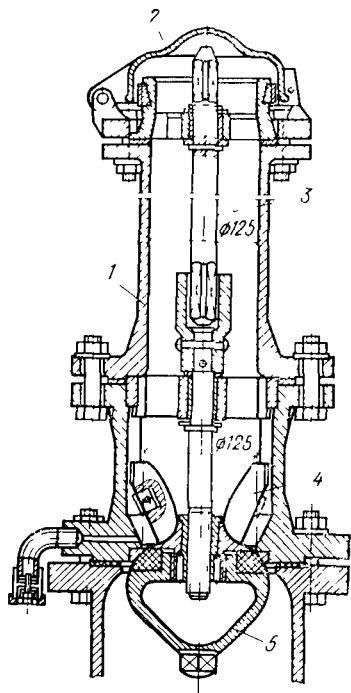


Рис 20 Гидрант пожарный подземный (ГОСТ 8228-62)

1 — корпус, 2 — крышка, 3 — штанга, 4 — шпиндель, 5 — затвор (кран)

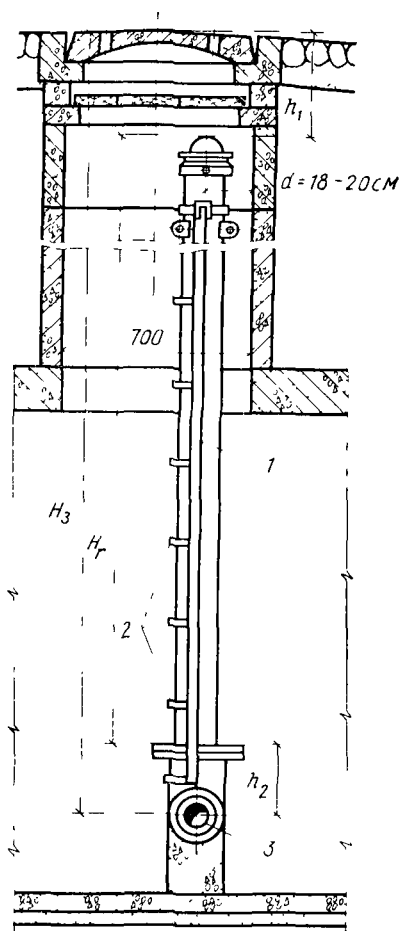


Рис 21 Установка пожарного подземного гидранта в водопроводном колодце

1 — гидрант, 2 — скобы, 3 — водопровод

ближе 5 м от стен зданий. Наибольшее расстояние от гидрантов до обслуживаемых ими зданий не должно превышать при противопожарных водопроводах низкого давления 150 м. Водопроводные линии с пожарными гидрантами располагают вдоль проездов не далее 2,5 м от края проезжей части дороги. На водопроводных линиях диаметром более 500 мм гидранты не устанавливают из-за сложности монтажа устройства колодцев. В этих случаях иногда прокладывают сопровождающие линии меньшего диаметра, на которых и монтируют

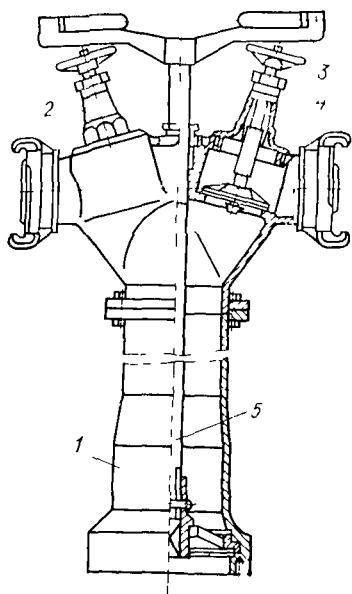


Рис 22 Пожарная колонка (ГОСТ 7499 71)

1 — корпус; 2 — вентиль; 3 — рукоятка, 4 — соединительная головка, 5 — штанга

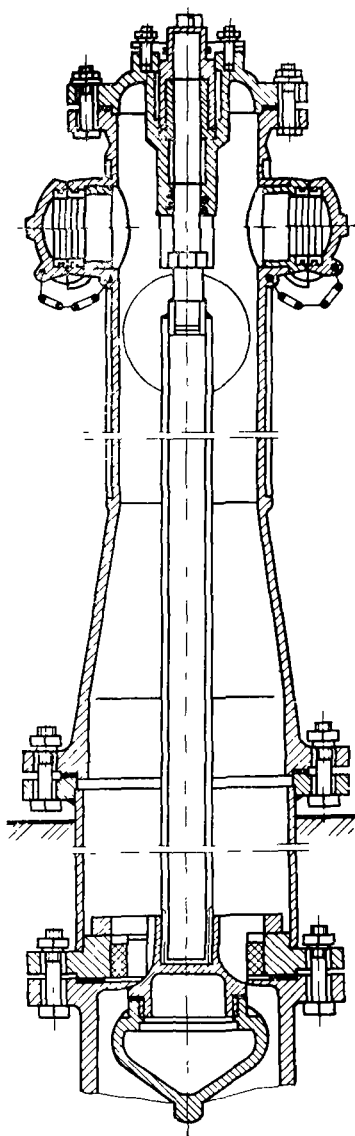


Рис 23 Пожарный наземный гидрант бесколодезного типа

гидранты. Для отбора воды при пожаротушении из подземных гидрантов применяют пожарную колонку (ГОСТ 7499—71) (рис 22). Пожарная колонка состоит из кор-

пуса, в нижней части которого имеется резьбовое соединение, предназначенное для подключения к гидранту, и корпуса с двумя патрубками, снабженными соединительными головками для подключения пожарных рукавов. Внутри колонки расположен трубчатый шток с муфтой, которая предназначена для соединения со штангой гидранта. Пожарная колонка имеет блокирующее устройство для предотвращения открывания и закрывания затвора гидранта при открытых вентилях, поэтому прежде чем привести в действие затвор гидранта, необходимо закрыть вентиль пожарной колонки. Поскольку вентили закрывают более продолжительное время, чем гидрант, то величина давления при гидравлическом ударе несколько уменьшается.

Процесс блокировки при работе колонки достигается расположением выдвижных маховиков на штуцерах колонки, в результате чего гидрант можно открыть или закрыть при полностью перекрытых отверстиях штуцеров.

#### Гидравлические показатели пожарной колонки

Расход воды, л/с . . . . .	10	20	30	40
Потери напора, м . . . . .	0,35	1,4	3,15	5,6

ВНИИПО совместно с воронежским заводом «Водомашинное оборудование» разработал бесколодезный наземный гидрант (рис. 23). Он состоит из чугунного корпуса, сверху которого расположены два патрубка диаметром 76 мм и один патрубок диаметром 125 мм. При вращении гайки штанга, соединенная со шпинделем, опускается вниз, открывая затвор гидранта для подачи воды. В момент закрывания гидранта затвор поднимается вверх и уплотнительное кольцо прижимается к седлу, перекрывая подачу воды. Нижняя часть корпуса гидранта расположена в грунте и с помощью фланцевого соединения прикреплена к стандартной пожарной подставке водопровода. Для уменьшения усилий, возникающих при открывании и закрывании гидранта, в верхней части корпуса расположен опорный шариковый подшипник, который закрыт крышкой. Для предотвращения попадания воды из корпуса гидранта в резьбовое соединение гайки и шпинделя (особенно зимой) в крышке установлены два уплотнительных кольца. Пропускная способность бесколодезного наземного гидранта (при потере напора  $h=10$  м) — 67 л/с.

В сельской местности, поселках и пригородах отпадает надобность в подземных гидрантах. В 1961 г. во ВНИИПО разработана конструкция гидранта, совмещенного с водоразборной колонкой (рис. 24). При подъеме рукоятки 2 вверх трубчатая штанга 7 отжимает пружину 14 и открывает клапан 13 для впуска воды в эжектор 11 колонки. По окончании отбора воды ручка опускается, клапан под давлением воды и пружины закрывается, подача воды прекращается. После выключения колонки вода сливается в нижнюю часть корпуса 1. При следующем отборе сливаемая часть воды засасывается эжектором в подающую трубу 6 колонки. При тушении пожара гидрант открывается и закрывается специальным ключом. Во время открывания гидранта рукояткой ключа вращается гайка 3 шпинделя 4, и трубчатая штанга 8 с затвором 10 гидранта опускается вниз. Вода через открывшийся затвор заполняет корпус гидранта и через отвод 5 и всасывающий рукав поступает в пожарный насос. В водопроводах высокого давления подача воды к месту пожаротушения может осуществляться непосредственно от гидранта. Конструкция гидрант-колонки предусматривает при ее ремонте возможность извлечения наружу всех деталей без раскопки траншеи. Для этой цели на конце штанги 8 закреплено металлическое кольцо 9 с двумя выступами. Выступы входят в пазы седла 12.

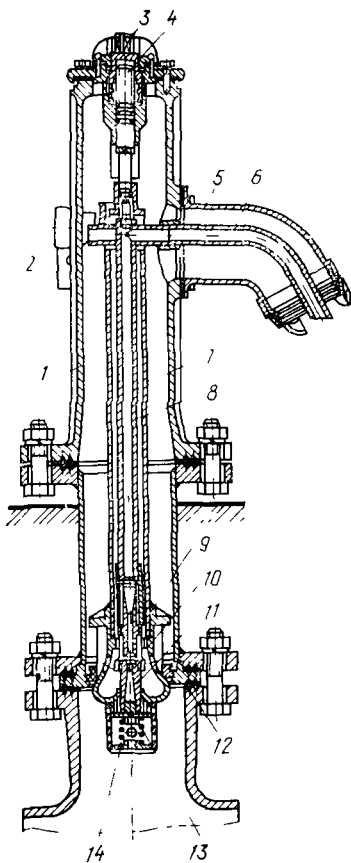


Рис 24. Гидрант, совмещенный с водоразборной колонкой

Для снижения величины гидравлического удара при работе гидранта использован затвор 10 обтекаемой формы с фигурными окнами для прохода воды. Его применение позволило почти в 2 раза увеличить время равномерного дросселирования потока воды.

#### Гидравлические показатели гидрант-колонки

Расход, л/с . . . . .	21	29	36
Потери напора, м . . . . .	10	20	30

### 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ ПОДАЧИ ВОДЫ ПО ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ И ВОДОВОДАМ

Для обеспечения требований бесперебойной работы водопроводной сети необходимо знать возможность и размер допустимого снижения подачи воды во время аварии. Эти сведения устанавливаются на основании анализа ущербов, причиненных потребителям временным прекращением или снижением подачи воды при тушении пожара или на основе оценки пожароопасных особенностей конкретного потребителя, анализа пожарной опасности исходных и промежуточных продуктов, обращающихся в производстве, представления о характере развития пожара и т. п.

Надежность любой технической системы обуславливается безотказностью работы, долговечностью, ремонтно-пригодностью и другими показателями. Все элементы системы водоснабжения являются «ремонтируемыми» и по истечении времени, необходимого для восстановления, снова вступают в работу. Поэтому отказ участка водопроводной сети может явиться следствием таких причин, как ошибки при проектировании, плохое качество строительства, неудовлетворительные условия эксплуатации, износ (старение) и аварии, вызванные непредвиденными обстоятельствами. Безотказность работы и долговечность элементов водопроводной сети (ее участков) зависят от материала и конструкции труб и их стыковых соединений; параметров и режимов работы водопроводного оборудования и арматуры; качества производства работы при укладке сетей и условий эксплуатации. Основным показателем, характеризующим надежность водопроводной сети и ее участков, является вероятность безотказности их работы.

Анализ теории систем массового обслуживания показывает, что закон распределения числа отказов в водопроводной сети достаточно близок закону Пуассона:

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda_i \tau)^n}{n!} e^{-\lambda_i \tau},$$

где  $n$  — среднее число отказов за продолжительность работы  $\tau$ ,  $P_n(\tau)$  — вероятность возникновения  $n$  отказов за продолжительность работы  $\tau$ ,  $\lambda_i$  — параметр Пуассона, равный среднему числу отказов в единицу времени,  $\tau$  — гарантированная продолжительность работы

Значения  $\lambda$  на 1 км водопроводных труб в год, полученные в МИСИ им В. В. Куйбышева, приведены ниже:

Диаметр, мм . . . . .	100	600	900
$\lambda$ для стальных труб . . . . .	0,92	0,53	0,56
$\lambda$ для чугунных труб . . . . .	0,46	0,59	0,95

По величине  $\lambda\tau$  находят среднее число отказов за указанный срок. При этом устанавливают также допустимую длительность периода снижения (или перерыва) подачи воды. Таким образом, зная частоту (повторяемость) или вероятность возникновения аварий (интервалы между отказами) и их продолжительность, можно предсказать и предусмотреть дополнительные мероприятия, направленные на устранение последствий отказов, вызванных авариями на водопроводной сети или водоводах (например, планово-предупредительные ремонты, графики форсированной работы насосов и т. п.). Однако нельзя прогнозировать аварии, вызванные непредвиденными обстоятельствами (например, землетрясения, засухи, суровые зимние условия и т. п.), поэтому важно знать требуемые численные критерии надежности водопроводной сети для каждой группы потребителей воды на пожарные нужды. В настоящее время отсутствуют такие численные критерии надежности водопроводных сетей, как допустимое число отказов за определенный срок, вероятность безотказной работы за определенный срок и т. п., но требования СНиП допускают возможность снижения подачи воды при аварии на одной из водопроводных линий или водоводе не более чем на 30 %. Вместе с этим указывается продолжительность ликвидации возможных аварий на водопроводной сети. Продолжительность ликвидации аварии  $\tau_a$  (срок восстановления) зависит от материала и диаметра труб, особенностей трассы водоводов, условий прокладки труб и



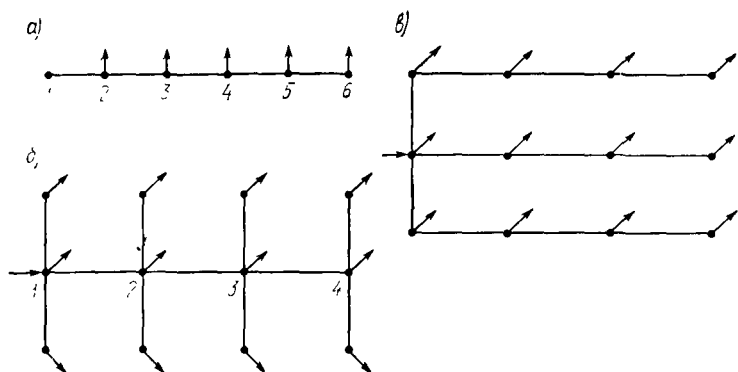


Рис 25 Схемы распределения подачи воды водопроводными линиями

*a* — тупиковая линия, *б* — тупиковая сеть с одной магистралью, *в* — тупиковая сеть с параллельными магистралями

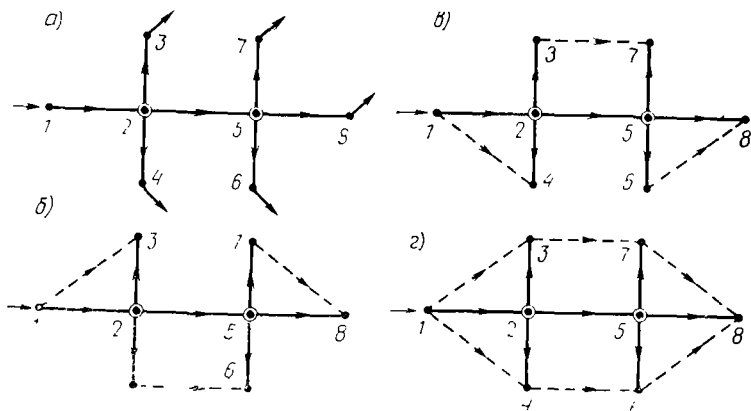


Рис. 26. Схемы повышения надежности разветвленной сети  
*a* — без связей, *б* — с тремя связками; *в* — с четырьмя связками *г* — с шестью связками

принимается по СНиП. Авария на участке с равнозначным показателем надежности может оказывать совершенно различное влияние на характер снижения подачи воды в зависимости от места расположения расчетного участка и его роли. Например, в водопроводной линии, состоящей из  $n$  последовательно соединенных участков сети с одинаковыми характеристиками надежности (рис. 25, *a*), авария на участке 5—6 лишает подачи воды лишь одного потребителя из пяти (снижение подачи воды на

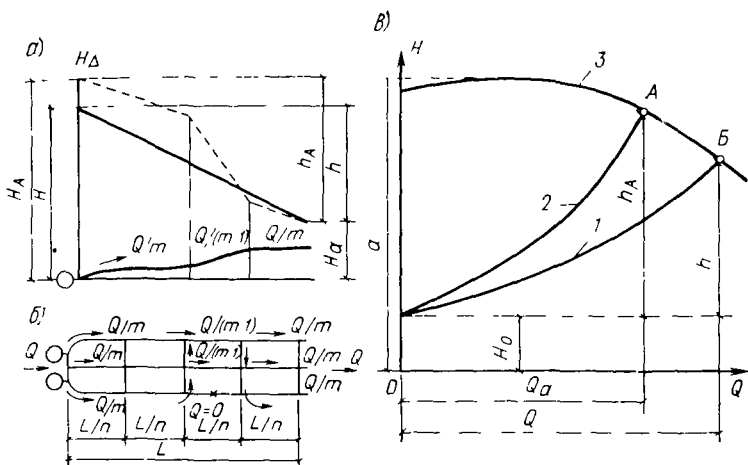


Рис 27 Расчетная схема водовода

*а* — разрез и связь между пьезометрическими напорами, *б* — план с указанием перемычек и потокораспределения воды при аварии, *в* — график совместной работы насосной и водоводов при нормальном и аварийном режимах

20 %), тогда как авария на участке 1—2 полностью прекращает подачу воды. Рассматривая другие типы распределительной сети (рис. 25, б, в), нетрудно убедиться, что надежность существенно зависит от трассировки водопроводной сети. При этом наиболее высокую надежность будет иметь сеть, приведенная на рис. 25, в. Надежность тупиковой водопроводной сети (рис. 26, а, б, в, г) с шестью вершинами повышают путем введения в нее резервных элементов, т. е. включением дополнительных связей, превращающих тупиковые линии в кольцевую сеть. Это приводит к увеличению протяженности сети, и следовательно, ее стоимости, поэтому необходимо знать наименьшее число связей для превращения разветвленной сети в кольцевую. Из рассмотренных примеров легко установить, что минимальное число связей для превращения разветвленной сети, имеющей  $K$  вершин первой степени, необходимо при нечетном значении  $K$  добавить  $(K+1) : 2$ , связей и  $K/2$  при четном значении  $K$ , т. е. для примера (рис. 27)  $(7+1) : 2 = 4$ .

Надежность водопроводной сети характеризует размер допустимого снижения подачи воды потребителям в случае аварии и выхода из работы некоторых ее участков. Выполнение требований по обеспечению потреби-

телей водой при аварии достигается выбором соотношения пропускных способностей магистралей и их связей. При проектировании водопроводную сеть рассчитывают на ряд наиболее неблагоприятных с точки зрения бесперебойности режимов работы. К ним относятся режимы работы системы во время наибольшего водопогребления (максимальный часовой расход в сутки наибольшего водопотребления) и во время подачи воды транзитом через сеть в напорно-регулирующие емкости. Кроме того, водопроводную сеть проверяют на подачу пожарного расхода в часы наибольшего водопотребления.

При аварии на одном участке магистрали изменится потокораспределение по всей сети, включая магистральные линии и связи. Для исключения аварийных участков на водопроводной сети устанавливают задвижки на расстоянии примерно 500 м один от другого. При отключении того или иного участка одновременно должно выключиться не более пяти гидрантов. Такой участок сети называется ремонтным. На характер снижения общего количества воды в распределительной системе наибольшее влияние оказывает авария на водоводах или участках магистралей, примыкающих к ним.

Рассмотрим вопрос бесперебойности подачи воды по водоводам при заданном размере допустимого снижения подачи воды при аварии на одном из его участков. Если разбить водовод на  $n$  участков (см. рис. 27, а, б), устроить переключения между водоводами и выключить при аварии только один участок водовода, можно добиться допустимого уменьшения подачи воды при аварийном режиме. При обычной работе водовода по каждому из  $m$  питок водоводов и по всем  $n$  участкам вода подается с расходом  $Q/m$  ( $Q$  — полный расход, подаваемый насосами). Графически (см. рис. 27, в) можно найти рабочую точку насосов Б при нормальном режиме работы водовода. Пусть водовод состоит из параллельно включенных питок одинакового диаметра и длины  $L$  с соединениями через каждые  $l=L/n$ . Если сопротивление каждой питки водовода будет  $s_0$ , то сопротивление системы параллельно соединенных питок водовода можно выразить формулой

$$s = s_0 n / m^2. \quad (18a)$$

Потери напора в водоводе определяют по формуле

$$h = s_0 n Q^2 / m^2. \quad (19)$$

По уравнению (18) построена кривая 1 (см. рис. 27, в).

В общем виде кривую  $Q-H$  насосов можно представить формулой

$$H_n = h + H_0 = a - vQ^2, \quad (20)$$

где  $H_n$  — напор насосов,  $a$  и  $v$  — коэффициенты, характеризующие тип насоса,  $Q$  — подача (расход) насосов.

По уравнению (20) построена кривая 3 (см. рис. 27, в).

При аналитическом решении задач о совместной работе насосов с водоводом используют уравнение, которое получается при подстановке выражения (19) в формулу (20):

$$a - vQ^2 = s_0 n Q^2 / m^2 + H_0. \quad (21)$$

Расход воды через водовод определяют по формуле, полученной из уравнения (21):

$$Q = \sqrt{[a - H_0] / s_0 n / m^2 + v}.$$

При аварии на участках водовода, параллельных аварийному, будет подаваться аварийный расход  $Q_a$ , который равен  $\varepsilon Q$  ( $\varepsilon$  — допустимое уменьшение подачи воды при аварии  $\varepsilon = Q_a / Q$ ). Пренебрегая очень малой величиной потерь напора в соединительных участках, получим величину сопротивления водовода при аварии

$$s_a = s_0(n-1)/m^2 + s_0/(m-1)^2.$$

Потери напора в водоводе при аварии находят по формуле

$$h_a = [s_0(n-1)/m^2 + s_0/(m-1)^2] Q_a^2. \quad (22)$$

По уравнению (22) построена кривая 2 (см. рис. 27, в) с той же начальной ординатой  $H_0$ . Как видно из рис. 27, в, сопротивление водовода при аварии возросло, следовательно, понизилась подача воды при аварии (рабочая точка  $AQ_a < Q$ ). Абсцисса этой точки даст величину расхода  $Q_a$ , который будет подаваться насосами при выключении поврежденного участка на линии водовода. Из уравнения (22) видно, что чем больше число соединений, тем меньше увеличивается при аварии сопротивление системы водовода и меньше снижается подача воды. Требуемое число переключений, обеспечивающее допустимое уменьшение подачи воды при ава-

рийном режиме водовода, определяют путем решения уравнения (18) относительно  $n$ :

$$n = \frac{\epsilon^2 s [m^2 / (m-1)^2 - 1]}{(b + s)(1 - \epsilon^2)}.$$

Для простейшего случая ( $b=0$  и  $\epsilon=0,7$ ) после подстановки  $Q_a = \epsilon Q$  требуемое число переключений вычисляют по формуле

$$n = m^2 / (m-1)^2 - 1$$

Вопросы надежности работы кольцевой водопроводной сети можно решать по аналогии с водоводами, при этом важно знать характер распределения потоков воды между параллельными ветвями кольца. Подача воды потребителям в случае аварии зависит от проводимости системы и ее отдельных элементов. Если нельзя предусмотреть устройство кольцевой сети или прокладку водоводов в несколько линий со связками, обеспечивают требуемую надежность системы водоснабжения с помощью других мероприятий. Например, при прокладке одной водопроводной линии на время ликвидации аварии в удаленной от водопитателя точке водопроводной сети можно предусмотреть запас воды из расчета требуемой подачи ее для тушения пожара. При этом требования СНиП допускают возможность снижения подачи воды на хозяйственно-питьевые нужды в размере 30 % расчетных.

Для повышения надежности работы противопожарных водопроводов постоянно наблюдают за состоянием и исправностью водопроводной сети, водопроводных колодцев, арматуры и пожарных гидрантов, своевременно устраняют замеченные дефекты.

Зимой нередки случаи замерзания отдельных участков линий (особенно тупиковых большой протяженности) и пожарных гидрантов. Замерзшие водопроводные трубы и гидранты отогревают паром или применяют электропрогрев, пропуская через стенки труб электрический ток. Основной причиной замерзания пожарных гидрантов является наличие воды в корпусе гидранта, которая остается после его работы или в результате проникания грунтовых вод через спускное отверстие. Для устранения этого дефекта при осенних осмотрах гидрантов (гидранты осматривают весной и осенью) спускное отверстие в мокрых колодцах накрывают деревянными пробками, что исключает проникновение воды в гидранты и ее замерзание.

## 6 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ

Определение гидравлических параметров системы подачи и распределения воды начинают с расчета водопроводной сети. Для водопроводной сети определяют диаметры труб и потери напора в ней для заданных расходов воды. От расчета водопроводной сети зависит не только ее пропускная способность и экономичность, но и параметры работы других, связанных с ней водопроводных сооружений (насосно-силового оборудования, запасных и регулирующих емкостей и т. п.). Диаметр труб водопроводных сетей и водоводов (табл. 12) устанавливают на основе технико-экономических расчетов, которыми определяют условия подачи заданного количества воды к местам отбора с наименьшими затратами на строительство и эксплуатацию. При проектировании структуры водопроводных сетей, распределяющих воду на хозяйственно-производственные и пожарные нужды, учитывают место расположения водонапорной башни и ее роль в системе противопожарного водопровода. Водопроводную сеть с водонапорной башней в начале сети (рис. 28) рассчитывают на два случая; 1) на подачу максимального хозяйственно-производственного расхода и 2) на подачу максимального хозяйственно-производственного и расчетного пожарного расхода воды. При этом необходимо не только выбрать диаметры труб и определить потери напора в водопроводной сети, но и установить напор у насосов станции и высоту водонапорной башни в зависимости от потерь напора в водопроводной сети при подаче расчетных расходов к местам отбора. Причем напор насосов  $H$  при подаче максимального расхода воды на хозяйственно-производственные нужды определяют по формуле

$$H = h_{\text{в}} + H_0 + (z_0 - z_p) + h_{\text{п}},$$

где  $h_{\text{в}}$  — потери напора в водоводе;  $H_0$  — высота водонапорной башни (до верхнего уровня воды в баке);  $z_0 - z_p$  — разность отметок земли у основания водонапорной башни и расчетного уровня воды в резервуаре;  $h_{\text{п}}$  — потери напора в насосной станции.

Напор насосов  $H_{\text{п}}$  при подаче максимального расхода воды на хозяйственно-производственные нужды и расхода воды для тушения пожара определяют по формуле

$$H_{\text{п}} = h_{\text{в п}} + \Sigma h_{\text{п}} + H_0 + (z_0 - z_p) + h_{\text{п}}, \quad (23)$$

где  $h_{\text{в п}}$  — потери напора в водоводе;  $\Sigma h_{\text{п}}$  — потери напора в водопроводной сети;  $H_0$  — свободный напор, необходимый для подачи воды на

Таблица 12. Гидравлические параметры водопроводных труб

Показатели	Диаметр труб, мм									
	100	125	150	200	270	300	350	400		
Расчеты (максимальный хозяйственный $Q_m$ плюс пожарный $Q_n$ ) расход воды, л/с	10	16	25	45	76	110	160	220		
Скорость, м/с	1,3	1,32	1,43	1,45	1,56	1,56	1,6	1,76		
Потери напора на 100 м, м	3,65	2,84	2,6	1,83	1,59	1,24	1,16	1,08		
Максимальный хозяйственный расход воды $Q_m$ , л/с	5	9	1,4	28	50	76	112	160		
Скорость, м/с	0,65	0,71	0,8	0,9	1,03	1,07	1,16	1,27		
Минимальный хозяйственный расход воды, л/с	3,5	6	9	20	35	50	80	40		
Скорость, м/с	0,45	0,5	0,52	0,64	0,77	0,71	0,88	0,88		
Потери напора на 100 м, м	0,52	0,46	0,39	0,1	0,16	0,28	0,31	0,28		

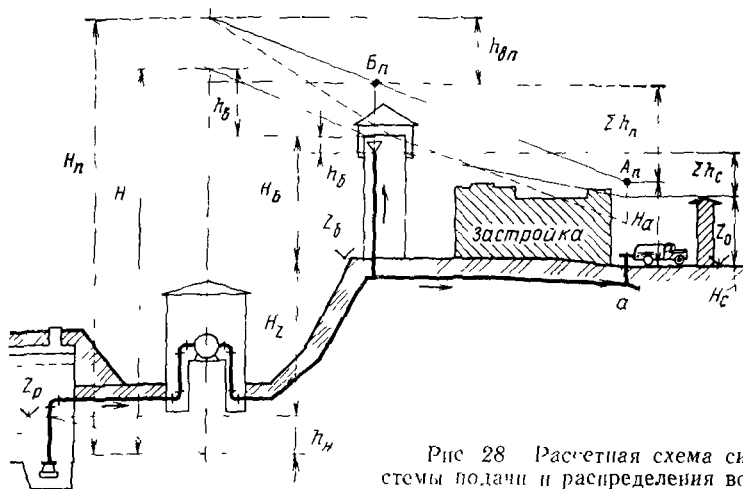


Рис 28 Расчетная схема системы подачи и распределения воды с башней в начале сети

пожарные нужды (принимается в зависимости от системы пожарного водоснабжения);  $z_0 - z_p$  — разность отметок земли у расчетного гидранта (наиболее удаленного и высокорасположенного от водопитателя и расчетного уровня воды в резервуаре),  $h_n$  — потери напора в насосной станции

Повседневное водопровод работает с расходом  $Q_M$  (наибольший хозяйственно-производственный расход) и имеет потери напора в сети  $\Sigma h_c$ . Во время пожаротушения водопроводная сеть пропускает расход  $Q_M + Q_{пн}$ . Увеличение расхода при пожаротушении вызывает увеличение потерь напора в сети, т. е.  $\Sigma h_{пн} > \Sigma h_c$ .

В зависимости от того, какая величина больше —  $H_c - H_0$  или  $\Sigma h_{пн} - \Sigma h_c$ , линия свободных напоров  $A_{пн} - B_{пн}$  при пожаротушении может пройти выше или ниже уровня воды в башне. Если высота водонапорной башни для первого и второго расчетных случаев мало отличается одна от другой, а протяженность водовода очень большая, пожарный запас воды (полный или частичный) целесообразно размещать в баке водонапорной башни. Такое решение позволяет уменьшить подачу и напор насосной станции, так как водовод можно рассчитать на подачу меньшего расхода воды. Уменьшение расхода воды в данном случае достигается за счет того, что пожарный расход воды (или часть его) будет подаваться не по водоводу, а из водонапорной башни. При коротких водоводах целесообразность выбора способа подачи и хранения пожарного расхода воды определяют тех-



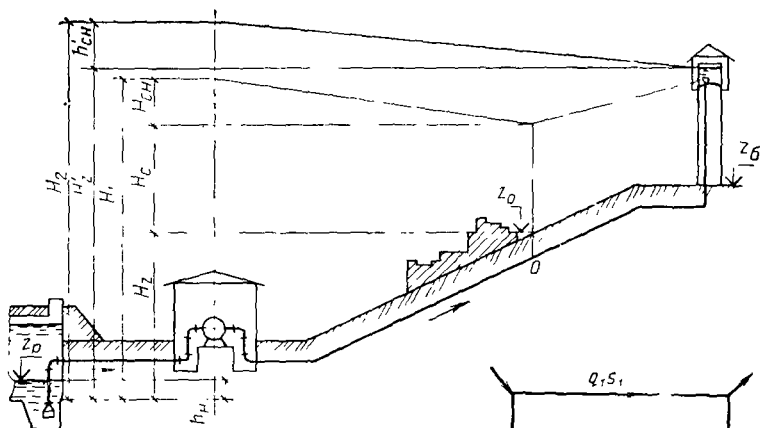
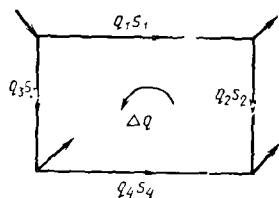


Рис 29 Расчетная схема водопровода с башней в конце сети

Рис 30 Расчетная схема кольцевой водопроводной сети



нико-экономическим расчетом. Если высота башни при пожаротушении оказывается значительно выше, чем при обычной работе водопровода, башню целесообразно отключать из работы, так как в противном случае подаваемый насосами расход  $Q = Q_M + Q_P$  частично будет поступать в бак, в результате чего уменьшатся расход и напор (пунктирная линия) в расчетной точке а (см. рис. 28). Когда линия свободных паноров  $A_P - B_P$  проходит ниже дна бака водонапорной башни, выключать башню при пожаротушении не требуется. В насосной станции в этом случае достаточно лишь увеличить подачу  $Q_M$  на величину расчетного пожарного расхода  $Q_P$ , т. е.  $Q = Q_M + Q_P$ .

Водопроводную сеть с водонапорной башней в конце сети (рис. 29) (контррезервуар) рассчитывают на подачу максимального хозяйственно-производственного и противопожарного расходов воды из условия, что часть воды подают насосы, а часть поступает из водонапорной башни. Вода в водопроводную сеть подается с двух сторон, что в значительной мере снижает протяженность транспортирования воды, а следовательно, и потери напора. Такую водопроводную сеть проверяют на случай минимального водопотребления, когда водопроводная

сеть распределяет часть воды, а оставшаяся часть поступает в водонапорную башню и восстанавливает испорченный пожарный запас. В системах противопожарного водоснабжения низкого давления башню, расположенную в конце сети, не выключают, так как расчетная точка пожаротушения всегда имеет свободный напор ниже ее высоты. Поскольку регулирующий объем воды в башне в момент возникновения пожара может быть равен нулю, а установка передвижного пожарного насоса возле башни вызовет быстрое ее опорожнение, гидравлические расчеты систем с контррезервуаром производят на подачу расхода воды также на  $Q_m + Q_p$ . В системах высокого давления водонапорная башня всегда отключается, и насосы подают расход воды  $Q_m + Q_p$  под соответствующим напором.

При гидравлических расчетах водопроводной сети важно знать потери напора в отдельных участках сети в зависимости от подаваемых по ним расходов воды путем гидравлических расчетов.

В отличие от разветвленной водопроводной сети, состоящей из отдельных водопроводных линий, по которым подается определенный расход воды, в кольцевой сети при заданной конфигурации можно наметить бесконечное множество вариантов потокораспределения воды по участкам сети. Так как кольцевая сеть представляет систему параллельно соединенных магистралей, то изменение диаметра даже одного участка приводит к перераспределению потоков воды во всех остальных участках сети. Поэтому при расчете кольцевой сети неизвестными являются не только диаметр  $d$ , но и расход воды  $q$  для всех участков (при разветвленных сетях неизвестны только диаметры). Таким образом, при расчете участков кольцевой сети приходится решать уравнение с двумя неизвестными — диаметр и расход. В кольцевой сети (рис. 30) могут быть составлены следующие уравнения для определения  $d$  и  $q$ :

алгебраическая сумма расходов воды для любого узла сети равна 0, т. е. количество воды, притекающей в узел, должно равняться количеству воды, уходящей из узла:

$$\Sigma q = 0; \quad (24)$$

алгебраическая сумма потерь напора в любом кольце сети равна 0, т. е. потери напора на участках, по которым протекает вода по часовой стрелке (по отношению

к данному кошту), должны быть равны потерям напора на участках, где вода движется против часовой стрелки:

$$\sum h = 0 \quad (25)$$

Число уравнений (24) равно числу узлов сети без одного (дающего тождество при заданном количестве воды, подаваемой в сеть). При этом туниковое ответвление либо сосредоточенный отбор или приток воды считают за узел.

Число уравнений (25) равно числу колец сети. Обозначив число колец через  $n$ , число узлов через  $m$  и число участков через  $p$ , можно сказать, что число неизвестных при расчете кольцевой сети равно  $2p$ , а число уравнений, которое можно составить для нахождения этих неизвестных,  $n+m-1$ . Это означает, что число неизвестных ( $2p$ ), поэтому в общем виде задача расчета кольцевой сети является неопределенной. Разработаны методы расчета водопроводных сетей, которые основаны на последовательном приближении или предварительных расчетах с последующей корректировкой принятых характеристик. Прежде чем приступить к определению потерь напора в водопроводной сети города, поселка, промышленного предприятия и т. п., устанавливают расходы воды, подаваемые по отдельным участкам сети. Распределение воды с сетью по территории объекта зависит от характера ее отбора. В обычных городских водопроводах можно считать отбор воды равномерно распределенным по длине водопроводной линии. Равномерно распределенный по линии и приходящийся на единицу ее длины расход воды называют удельным. При расходе воды  $Q$ , л/с, и суммарной по длине линии  $\sum l$ , распределяющей этот расход, удельный расход будет

$$q_0 = Q / \sum l.$$

В суммарную длину  $\sum l$  не входят участки, проходящие по незастроенной территории. В городах удельный расход воды зависит от характера застройки, плотности заселения и характеристики устройств, отбирающих воду. Кроме равномерно распределенного расхода воды в городах, на промышленных предприятиях и других объектах имеются сосредоточенные расходы (сравнительно большие расходы воды, отбираемые банями, прачечными, отдельными предприятиями и т. п.).

Равномерно распределенный вдоль всей линии  $l$  так называемый «путевой» расход воды

$$q_n = q_0 l.$$

Для удобства гидравлических расчетов «путевой» расход заменяют эквивалентным ему узловым расходом (т. е. таким расходом, который дает те же потери напора на линии) При этом половину «путевого» расхода воды  $q_n$  относят к концу линии, а другую половину — к началу линии, и находят узловый расход воды

$$q_y = 0,5 \Sigma q_n$$

Водопроводная сеть с определенными по ее узлам расходами воды является условной расчетной схемой, по которой производится распределение потоков воды по сети, необходимой для выбора диаметров труб и определения общих потерь напора. Расчет водопроводной сети проводят в такой последовательности:

разбивают сеть на участки и определяют их длину; определяют «путевые» расходы  $q_n$ , приводят их к узловым расходам  $q_y$  из условия соблюдения уравнения  $\Sigma q = 0$  для каждого узла;

намечают приближенно потоки движения воды по каждой линии из условий кратчайшего пути подачи расходов к местам отбора и взаимозаменяемости отдельных участков при аварии;

выбирают по намеченным расходам диаметры всех участков сети (см табл. 12);

производят гидравлический расчет («увязку») сети, т. е. определяют величины действительных расходов по линиям сети для назначенных диаметров при условии соблюдения уравнения  $\Sigma h = 0$ .

В процессе гидравлического расчета диаметры большинства участков не меняются и величина сопротивлений остается постоянной Проф В. Г. Лобачев на основе итеративного способа решения системы квадратных уравнений разработал теорию расчета кольцевых водопроводных сетей. Для пояснения метода В. Г. Лобачева рассмотрим контур с заданными диаметрами, длинами участков и намеченным распределением расходов воды (см рис. 30).

При первом распределении потоков не удалось получить увязки кольца, т. е.  $\Sigma h = \Delta h \neq 0$  и по контуру получена невязка

$$\Delta h = s_1 q_1^2 + s_2 q_2^2 - s_3 q_3^2 - s_4 q_4^2. \quad (26)$$

Пусть  $h > 0$  и перегруженными являются верхняя и правая ветви контура. Для получения равенства  $\Sigma h = 0$  или  $\Delta h = 0$  перераспределяем какой-то известный расход воды  $\Delta q$  по линиям кольца в направлении, обратном знаку невязки, в результате чего предполагается получить равенство

$$s_1 = (q_1 - \Delta q)^2 + s_2 (q^2 - \Delta q)^2 - s_3 (q_3 + \Delta q)^2 - s_4 (q_4 + \Delta q)^2 = 0.$$

Преобразуем равенство (26), т. е., раскрывая скобки и исключая члены, содержащие  $(\Delta q)^2$  как относительно малые по сравнению с  $q$ , определим

$$\Delta q = s_1 q_1^2 + s_2 q_2^2 - s_3 q_3^2 - s_4 q_4^2 / 2 (s_1 q_1 + s_2 q_2 + s_3 q_3 + s_4 q_4). \quad (27)$$

Выражение в числителе представляет невязку в кольце  $\Delta h$ , полученную при первоначальном перераспределении расходов. Знаменатель же является удвоенной суммой произведений расхода каждого участка на его сопротивление, поэтому выражение (27) можно представить в виде

$$\Delta q = \Delta h / 2 \Sigma s q$$

Зная  $\Delta q$ , найдем новые величины расходов по всем участкам:

$$\left. \begin{aligned} q'_1 &= q_1 - \Delta q, & q'_2 &= q_2 - \Delta q \\ q'_3 &= q_3 + \Delta q, & q'_4 &= q_4 + \Delta q. \end{aligned} \right\}$$

По расходам  $q'$  определим потери напора на всех участках и величину новой невязки. Эта величина еще не будет равна 0, так как формула (23) дает приближенное решение. Поэтому проводим несколько циклов увязки до тех пор, пока не будет выполнено требуемое условие  $\Sigma h = \Delta h_{\text{доп}}$ . Если сеть состоит из нескольких колец, то задача сводится к решению системы линейных уравнений, равных числу колец в сети. Неизвестными являются поправочные расходы  $\Delta q$  в каждом кольце. Для получения требуемого распределения потоков воды их перераспределяют таким образом, чтобы освободить перегруженные ветви и дополнить недогруженные. Расходы перераспределяют до тех пор, пока невязки во всех кольцах не станут близкими к 0. Для практических целей обычно достаточно довести невязки по отдельным кольцам до  $\Delta h_{\text{доп}} = 0,3 - 0,5$  м. Затем определяют величину невязки по объемлющему контуру сети, которая должна быть не более 1—1,5 м. На этом

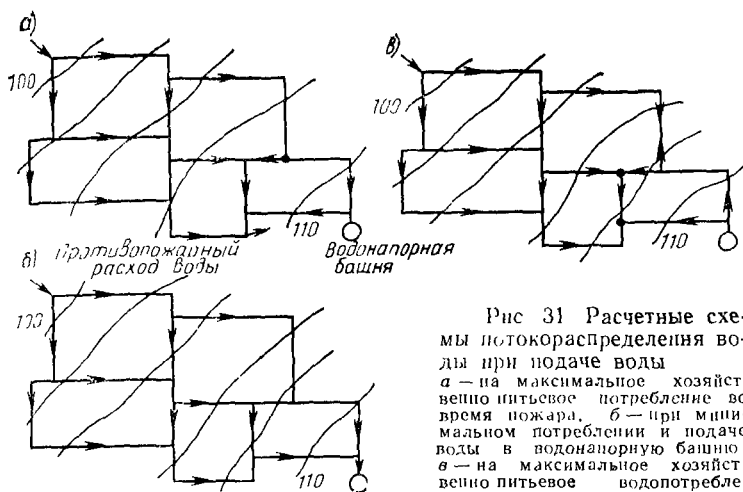


Рис 31 Расчетные схемы потокораспределения воды при подаче воды  
 а — на максимальное хозяйств. внешн. питьевоe потребление во время пожара, б — при минимальном потреблении и подаче воды в водонапорную башню, в — на максимальное хозяйств. внешн. питьевоe водопотребление

увязка сети заканчивается и полученные из расчета величины потерь напора принимают для определения высоты водонапорной башни и параметров водопитателя.

При гидравлических расчетах различные варианты трассировки водопроводной сети принимают в зависимости от предполагаемой схемы водоснабжения и режима работы водопроводных сооружений. В рассматриваемом примере подача воды в сеть производится в точке 1 (отметка земли 100 м), а в точке 4 (отметка земли 108 м) к сети присоединена водонапорная башня. При этом возможны следующие расчетные случаи (рис. 31). подача максимального расхода воды на хозяйственные нужды при одновременном расходе воды на тушение пожара; подача воды при минимальном водопотреблении и одновременной подаче воды в водонапорную башню; подача максимального хозяйственного расхода воды при одновременной работе насосной станции и водонапорной башни. Необходимо отметить, что расчет водонапорной сети на случай пожаротушения является по существу проверочным расчетом, поскольку диаметры трубопроводов отдельных участков сети определяют при гидравлическом расчете сети для максимального хозяйственно-производственного расхода, т. е. для повседневной работы водопровода. Пропуск пожарных расходов воды является эпизодическим, поэтому при пожаротушении до-

Таблица 13. Предельные расходы воды в трубах

Диаметр трубопровода, мм	Расход воды, л/с, при $U$ , равном 2 м/с		Диаметр трубопровода, мм	Расходы воды, л/с при $U$ , равном 2,5 м/с	
	одностороннее питание	двустороннее питание		одностороннее питание	двустороннее питание
100	15,7	31,4	100	19,5	39
125	24,5	49	125	30,5	61
150	35,3	70,6	150	44	88
200	62,8	125,6	200	78	157

пускается форсированная работа водопровода. Значительная часть магистральных линий при этом транспортирует увеличенные расходы воды, вследствие чего возрастают скорости потока воды в трубах и потери напора. Наибольшая скорость потока воды в трубах не должна превышать 2—2,5 м/с. На схеме гидравлического расчета для каждой водопроводной линии обычно указывают диаметр, длину, расход, скорость и потери напора. Исходя из предельной скорости потока воды, подсчитывают предельные расходы воды в трубах (табл. 13).

При гидравлических расчетах следует правильно установить предполагаемые точки пожара. В этом случае надо руководствоваться следующим. Если в зависимости от характера объекта на основании действующих нормативов принимается один расчетный пожар, то подача воды на пожаротушение будет производиться из самого высокого и наиболее удаленного от источника гидранта. При сложном рельефе местности и развитой конфигурации водопроводной сети, трудно бывает определить точку расчетного пожара, поэтому критическую точку определяют с помощью проверочных расчетов. Когда расчет производят на несколько расчетных пожаров, их намечают в разных районах объекта, но так, чтобы все основные магистральные линии сети были проверены на пропуск пожарных расходов воды. Иногда рекомендуется производить первоначальный выбор диаметров сети и ее расчет на пропуск максимальных хозяйственно-питьевых расходов воды, делая лишь проверочный расчет на случай пожаротушения. Однако более целесообразно выбирать диаметр сети исходя из условия одновременной подачи воды на пожаротушение в

наиболее неблагоприятной точке. Особенно это важно для небольших водопроводов, где пожарные расходы воды по сравнению с хозяйственными относительно велики.

## 7. НАСОСНЫЕ СТАНЦИИ ДЛЯ ПОДАЧИ ВОДЫ

Насосные станции подразделяются на станции I и II подъема и повысительные. В качестве насосных агрегатов преимущественно используют центробежные насосы, приводимые в действие электродвигателями. В качестве резервных (при наличии одного источника энергоснабжения) применяют насосные агрегаты с двигателями внутреннего сгорания (карбюраторные и дизельные). Насосы в насосных станциях бывают производственно-хозяйственные, производственно-пожарные и пожарные. Пожарные насосы в свою очередь подразделяются на насосы низкого и высокого давлений. Пожарные насосы располагают в насосных II подъема и если они отсутствуют — в насосных I подъема.

Насосные станции I подъема (рис. 32) забирают воду из водонесущего источника и в зависимости от принятой схемы водоснабжения подают ее на очистные сооружения или, если этого не требуется, в резервуары, водонапорную башню или водопроводную сеть. Надежность работы станции I подъема достигается установкой резервных насосов, устройством не менее двух водоводов и всасывающих линий. Вместе с этим предусматривают меры, исключающие перебои подачи воды в случае временной остановки или ремонта отдельных элементов водопитателя. Помимо подачи воды на хозяйственно-питьевые и производственные нужды насосная станция пополняет израсходованный при тушении пожара неприкосновенный запас воды в резервуарах чистой воды, что достигается увеличением продолжительности работы насосов (в случае когда насосы не работают круглосуточно), включением дополнительных насосов или возможным сокращением водопотребления на другие нужды. При равномерной работе насосов в течение суток подачу насосов в насосной станции I подъема определяют по формуле

$$Q_1 = k Q_{\text{сут}} / 24,$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий расход воды на нужды водопровода принимается равным 1,02 при отсутствии очистных сооружений и 1,04–1,1 при их наличии



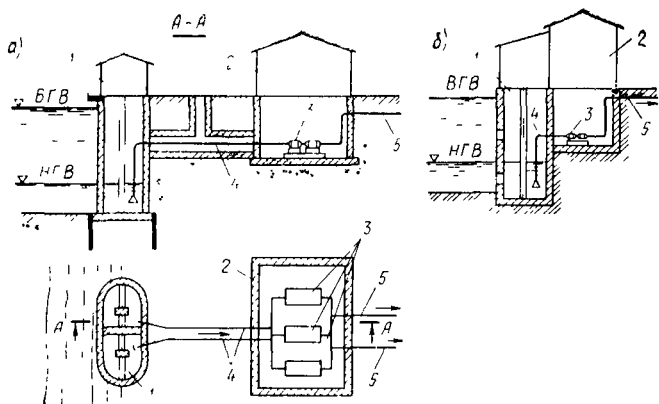


Рис 32 Схема насосной станции I подъема

*а* — с отдельным водоприемником, *б* — с совмещенным водоприемником, 1 — водоприемник, 2 — насосная станция, 3 — насосно силовые агрегаты, 4 — всасывающий трубопровод, 5 — напорный трубопровод

Иногда в насосных I подъема устанавливают дополнительные насосы для пополнения неприкосновенного пожарного запаса воды. Подачу этих насосов вычисляют по формуле

$$Q = [(Q_{\text{п}} - Q_1) \tau_{\text{T}} + \Sigma Q] / \tau_{*},$$

где  $Q_{\text{п}}$  — пожарный расход воды,  $Q_1$  — средняя подача насосов I подъема,  $\tau_{\text{T}}$  — продолжительность тушения пожара,  $\Sigma Q$  — суммарный произведен по хозяйственный расход за расчетный период наибольшего водопотребления,  $\tau_{*}$  — продолжительность пополнения пожарного запаса воды, устанавливаемая противопожарными нормами

На графике (рис 33) показан характер изменения расхода воды, необходимого для пополнения неприкосновенного запаса воды, в зависимости от численности населения. Из графика видно, что устройство дополнительных насосов для пополнения неприкосновенных запасов воды в резервуарах требуется в небольших населенных местах. Например, в населенном пункте с населением 10 тыс. чел подача этих насосов составляет 8% подачи насосов станции I подъема

Насосные станции II подъема (рис. 34) подают воду к потребителям обычно из резервуаров чистой воды. Эти станции являются основными сооружениями, обеспечивающими подачу воды на пульты пожаротушения. Вода может быть подана под необходимым напором для

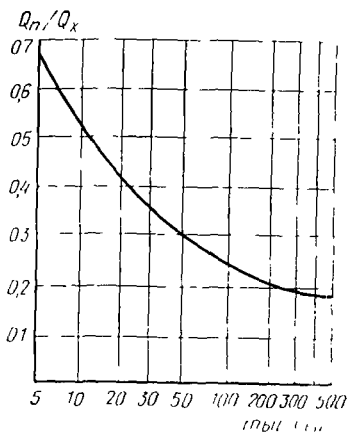
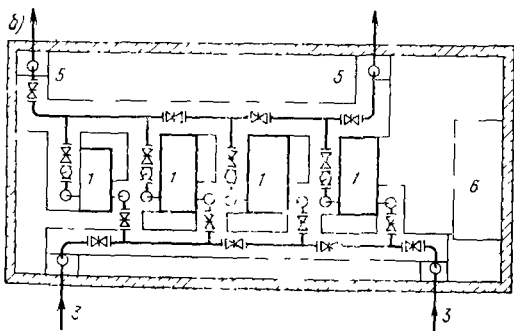
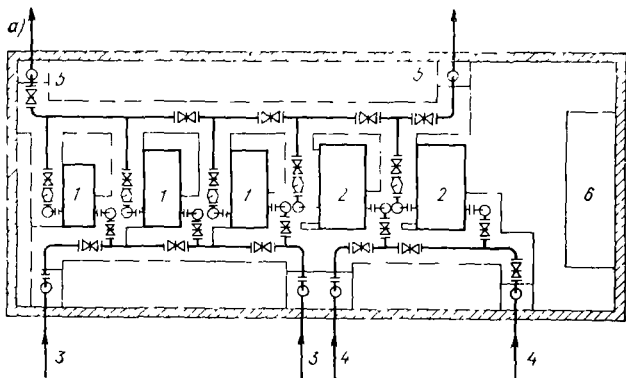


Рис 33 Зависимость расхода воды для пополнения неприкосновенного пожарного запаса воды от численности населения

Рис 34 Пасосная станция III подъема

а — с установкой пожарных насосов  
 б — с установкой дополнительных насосов  
 1 — насосы хозяйственно-питьевые  
 2 — насосы пожарные, 3 — всасывающие линии хозяйственно-питьевых насосов  
 4 — всасывающие линии пожарных насосов, 5 — напорные трубопроводы, 6 — электрораспределительное устройство



тушения пожаров непосредственно от пожарных гидрантов (система высокого давления) или под напором, достаточным для тушения пожаров передвижными пожарными автонасосами (системы низкого давления). Насосы II подъема рассчитывают на подачу воды для тушения пожаров при наибольшем часовом расходе воды на производственно-хозяйственные нужды. Если необходимый для пожаротушения напор равен или меньше напора производственно-хозяйственных насосов, то пожарный насос устанавливают такого же напора, как и остальные насосы, а подача суммарного пожарного и производственного расходов воды обеспечивается параллельным включением дополнительных (пожарных) насосов. Когда необходимый для пожаротушения напор окажется выше напора производственно-хозяйственных насосов, устанавливают отдельные пожарные насосы, подача которых обеспечивает пожарный и максимальный производственно-хозяйственные расходы. При работе этого насоса производственно-хозяйственные насосы выключаются.

Повысительные насосные станции (рис. 35) устраивают для повышения напора (для подкачки воды) на отдельных участках сети или зданий.

По степени надежности водопроводные насосные станции подразделяются на три категории. К первой категории, согласно требованиям, относятся насосные станции, которые обслуживают объекты с технологическим оборудованием, не допускающим перерыва подачи воды (например, металлургические, химические и другие производства), или перерыв подачи воды может привести к большому материальному ущербу и остановке сложного технологического процесса. Насосные второй категории допускают короткий перерыв в подаче воды потребителям на время, необходимое для включения обслуживающим персоналом резервных агрегатов. Насосные третьей категории допускают перерыв в подаче воды потребителям на время ликвидации аварии, но не свыше одних суток (в населенных местах с числом жителей до 5000 чел., во вспомогательных цехах и т. п.).

Насосные станции многофункциональных систем коммунального водоснабжения городов относятся к первой категории надежности, а при наличии емкостей с соответствующим пожарным запасом воды, обеспечивающих необходимую подачу воды под соответствующим напором при выключении насосов,— ко второй категории.

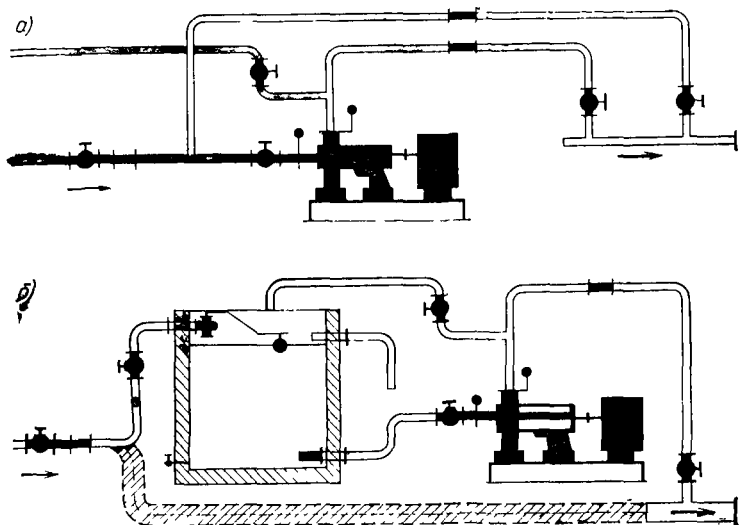


Рис. 35. Схемы повысительных насосных станций  
 а — повышения давления, б — повышения давления и увеличения подачи

На пожарных насосах устанавливают резервные насосы, число которых зависит от класса надежности в соответствии с нормативными требованиями. Насосные станции первой и второй категории надежности бесперебойно снабжаются энергией, для чего их присоединяют к двум независимым источникам энергии или питают от двух отдельных фидеров. В некоторых случаях их подключают к резервным агрегатам, установленным на электростанциях, или к тепловым двигателям в насосных станциях. Бесперебойность работы насосных станций обеспечивается автоматической системой, позволяющей переключать питание аварийных насосно-силовых агрегатов на резервные. Для облегчения устройства автоматизации и повышения надежности работы насосов в насосных станциях первой и второй категории насосные агрегаты рекомендуется располагать ниже расчетного уровня воды в водосточнике, или резервуаре чистой воды. К всасывающим линиям насосных агрегатов предъявляются следующие требования:

всасывающих линий независимо от числа групп насосов, включая пожарные, должно быть не менее двух; при выключении одной линии остальные должны пропускать весь расчетный расход воды;

пожарные насосы целесообразно оборудовать самостоятельной всасывающей линией.

Для зданий водопроводных станций с пожарными насосами, которые по степени пожарной опасности относятся к категории Д, используют строительные конструкции I степени огнестойкости для насосных первой категории надежности и конструкции II степени огнестойкости — для насосных второй категории надежности. Один рабочий пожарный насос может быть установлен в зданиях не ниже II степени огнестойкости. Помещения насосных станций рекомендуется блокировать с другими зданиями и сооружениями. В этом случае насосная станция отделяется негоряемыми ограждающими конструкциями и имеет самостоятельный выход наружу. Из трансформаторных помещений и электрораспределительных устройств также предусматривают отдельные выходы. При наличии тепловых двигателей у пожарных насосов помещение насосной оборудуют внутренним противопожарным водопроводом.

## 8. РЕЗЕРВУАРЫ ЧИСТОЙ ВОДЫ

Резервуары чистой воды, расположенные между очистными сооружениями (насосной I подъема) и насосной станцией II подъема, выполняют роль регулирующих и запасных емкостей. Регулирующая емкость позволяет добиться равномерной работы насосных станций при изменяющемся по времени отборе воды потребителями.

Насосные станции I подъема, так же как и очистные сооружения, работают круглосуточно с постоянной производительностью. В то же время насосы станции II подъема включают в зависимости от режима потребления воды по ступенчатому графику. Емкость резервуара чистой воды определяют путем совмещения графиков подачи воды насосами I подъема (рис. 36) (кривая 1) и отбора воды насосами II подъема (кривая 2). Подача насосов станции I подъема  $Q_1$  составляет 4,17 % суточного расхода. При двухступенчатой работе насосов II подъема в интервале от 20 до 6 ч расход  $Q_2$  составляет 2,84 %, а с 6 до 20 ч — 5,12 %. Если в 20 ч резервуар пуст ( $W_p = 0$ ), то с 20 до 6 ч резервуар наполняется водой ( $Q_1 > Q_2$ ), а с 6 до 20 ч происходит уменьшение накопленного в нем запаса воды ( $Q_1 < Q_2$ ).

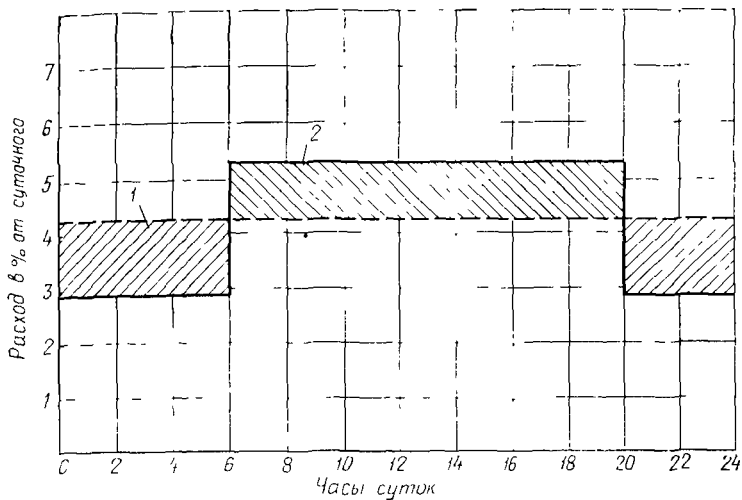


Рис 36 График работы насосов I и II подъемов

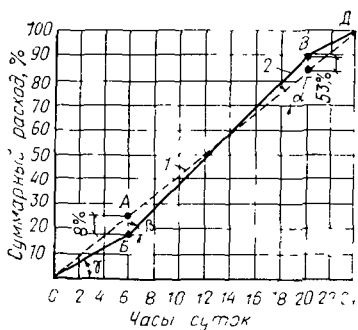


Рис 37 Интегральный график подачи и отбора воды из резервуара

1 - подача воды с расходом 4,17 % суточного расхода 2 - интегральная кривая

Вместимость резервуара определяют по табл. 14, которую составляют по периодам работы насосов II подъема от 0 до 6 ч, от 6 до 20 ч и от 20 до 24 ч. Из табл. 14 видно, что вместимость резервуара составляет  $8 + 5,3 = 13,3$  % суточного расхода воды. Аналогичный результат получается при определении регулирующей емкости по интегральному графику подачи и отбора воды из резервуара (рис. 37).

Отбор воды из резервуара насосами II подъема показан кривой (О—Б—В—Д). Подача воды в резервуар показана кривой О—Д. Угол наклона к горизонту характеризует интенсивность подачи или отбора воды: чем больше угол наклона, тем интенсивнее подача или

Таблица 14. Определенне вместности резервуара

Период суток, ч	Подача в резервуар, $Q_1$ , %	Отбор из резервуара $Q_2$ , %	Поступает в резервуар, %	Выходит из резервуара, %	Остаток в резервуаре, % суточного
0—6	25	17	8	—	8
6—20	58,3	71,6	—	13,3	5,3
20—24	16,7	11,4	5,3	—	0

отбор воды из резервуара. Углу наклона  $\alpha$  соответствует подача воды с расходом 4,17 %, углу наклона  $\beta$  — с расходом 5,12 % и углу наклона  $\gamma$  — с расходом 2,84 %. Разность ординат между линией отбора и линией подачи воды представляет собой остаток воды в резервуаре в определенный момент времени. Из графика видно, что за 6 ч в резервуар подано 25 % (точка А) и отобрано 17 %, т. е. в резервуар поступило 8 %. Общая емкость резервуара определяется суммой отрезков  $AB$  и  $BГ$ , т. е.  $8+5,3=13,3$  %. Кроме регулирующего объема, в резервуарах чистой воды хранят запасные объемы воды на производственные нужды (на случай временного увеличения водопотребления); на возможный перерыв в подаче воды (в случае аварии); на пожарные нужды (неприкосновенный пожарный запас воды). Требуемые запасы воды на производственные нужды выбирают с учетом длительности восстановления последствий аварии.

Если источники водоснабжения (очистные сооружения, артезианские скважины и т. п.) не могут обеспечить подачу воды во время пожара, то в емкостях предусматривается хранение неприкосновенного пожарного запаса воды. Последний обеспечивает бесперебойную подачу воды при тушении пожаров. Объем неприкосновенного пожарного запаса воды определяют по расчетному расходу воды в течение времени  $\tau_T$ :

$$W_{II} = Q_{II} \tau_T + \Sigma Q,$$

где  $W_{II}$  — неприкосновенный пожарный запас воды,  $Q_{II}$  — пожарный часовой расход воды;  $\tau_T$  — продолжительность подачи воды для пожаротушения,  $\Sigma Q$  — суммарный расход воды по совмещенному графику наибольшего водо потребления за время пожаротушения

Если гарантирована бесперебойная подача воды из водоисточника в резервуары чистой воды, то при расчете емкости учитывают пополнение объема за время тушения пожара. В таком случае насосы II подъема отбирают из резервуара пожарный и хозяйственно-пить-

евой расход, а насосы I подъема подают расход воды  $Q_1$ . Объем неприкосновенного запаса воды в резервуаре в этом случае определяют по формуле

$$W_n = (Q_n - Q_1)\tau_r + \Sigma Q,$$

где  $Q_1$  — подача насосов I подъема.

Максимальный срок восстановления неприкосновенного пожарного запаса воды в населенных местах и на предприятиях с производствами категории пожарной опасности А, Б, и В должен быть не более 24 ч, а на предприятиях Г и Д — 36 ч. Для промышленных предприятий с пожарными расходами воды 20 л/с и менее допускается увеличение продолжительности восстановления неприкосновенного пожарного запаса воды: для предприятий с производствами категорий пожарной опасности В — до 36 ч; для Г и Д — до 48 ч.

Если пожарный запас воды не может быть пополнен в указанное время, то увеличивают вместимость резервуара, в котором хранится этот запас. Дополнительный объем пожарного запаса воды для компенсации продолжительности его пополнения определяют по формуле

$$\Delta W_n = W_n(\tau - \tau_*)/\tau,$$

где  $\tau$  — продолжительность восстановления пожарного запаса воды,  $\tau_*$  — требуемая продолжительность пополнения пожарного запаса воды

Продолжительность восстановления неприкосновенного пожарного запаса воды  $\tau_*$  должна быть меньше или равна промежутку времени между окончанием одного и началом следующего пожара. Этот промежуток времени устанавливают по формуле

$$\tau_* = 24/\nu_* - \tau_r,$$

где  $\nu_*$  — расчетное число пожаров в сутки,  $\tau_r$  — расчетная продолжительность отбора воды из водопровода

Нормативная продолжительность восстановления неприкосновенного пожарного запаса воды будет достаточна лишь для населенных мест с численностью населения около 100 тыс. чел. В населенных местах с численностью населения свыше 100 тыс. чел. нормативная продолжительность будет превышать фактически необходимое для восстановления израсходованного запаса воды  $\tau_*$ . В этих случаях значения  $\tau_*$  принимают по формуле (28).

Резервуары чистой воды сооружают из железобетона, кирпича и бутового камня. Наибольшее распространение имеют железобетонные резервуары объемом 100—2000 м<sup>3</sup>. Резервуары оборудуют трубопроводами



для подачи и отбора воды, а также трубами для слива и сброса грязной воды при ремонте. Арматуру для переключения трубопроводов размещают непосредственно в помещении насосной станции или в специальных камерах.

В насосных станциях (без выделенной группы пожарных насосов), имеющих всасывающие линии, применяют автоматические указатели уровней (размещенные на отметке уровня неприкосновенного пожарного запаса), которые включают дополнительный насос или выключают работу насосов хозяйственно-питьевого назначения в насосной II подъема. Кроме автоматических сигнальных устройств, контролирующих уровень неприкосновенного пожарного запаса воды, применяют специально смонтированные всасывающие линии насосов, которые исключают отбор неприкосновенного пожарного запаса воды производственно-хозяйственными насосами. Кожух, установленный на всасывающей линии, предупреждает загнивание воды в запасном резервуаре.

Всасывающую трубу производственно-хозяйственного насоса иногда выводят на уровень неприкосновенного пожарного запаса и в верхней ее части предусматривают отверстие. Вода к насосам через трубу поступает до тех пор, пока не обнажится отверстие на верху трубы и в нее попадет воздух. Оставшийся ниже отверстия на верху трубы объем воды может быть использован лишь пожарными насосами.

## 9. ВОДОНАПОРНЫЕ БАШНИ И ГИДРОКОЛОННЫ

Водонапорные башни предназначены для регулирования неравномерности водопотребления, хранения неприкосновенного запаса воды и создания требуемого напора в водопроводной сети.

Емкость бака водонапорной башни определяют по формуле

$$W_6 = W_p + W_{пз},$$

где  $W_p$  — регулирующая емкость бака,  $W_{пз}$  — неприкосновенный запас воды

Неприкосновенный запас воды вычисляют по формуле

$$W_{пз} = W_{хоз}^{10 \text{ мин}} + W_{пож}^{10 \text{ мин}},$$

где  $W_{хоз}^{10 \text{ мин}}$  — запас воды определяемый по максимальному расходу на хозяйственно-питьевые и производственные нужды во время тушения пожара;  $W_{пож}^{10 \text{ мин}}$  — запас воды на 10-минутное пожаротушение

Запас воды на 10-минутное пожаротушение определяют из условия подачи воды для тушения:

одного внутреннего и одного наружного пожара в населенном пункте;

одного пожара внутренними пожарными кранами, а также спринклерными или дренчерными установками на промышленном предприятии;

одного пожара внутренними пожарными кранами в отдельно стоящем здании с установленным в нем водонапорным баком или гидроневматической установкой.

Пожарный запас воды в баке принимают по большему расчетному расходу предприятия или населенного места. Регулирующую емкость бака определяют по совмещенному графику водопотребления и подачи насосной станции и с помощью интегрального графика (рис. 38). Угол наклона отдельных участков кривой 1 к оси абсцисс характеризует интенсивность потребления воды за определенный промежуток времени. Когда кривые 2 или 3 находятся выше кривой 1, в баке накапливается вода. В часы расположения кривой 1 выше кривой 2 или 3 происходит забор воды из бака. Регулирующая емкость бака определяется суммой абсолютных величин максимальных положительных и отрицательных разностей ординат кривых подачи и потребления. При равномерной работе насосов регулирующая емкость бака составит  $14,3 + 5,5 = 19,8\%$ , а при неравномерной работе  $7,5 + 2 = 9,5\%$  суточного расхода воды. Запас воды для 10-минутного тушения одного наружного и одного внутреннего пожаров ( $m^3$ ) определяют по формуле

$$W_{\text{пож}}^{10 \text{ мин}} = 0,6 (Q_{\text{в}} + Q_{\text{н}}),$$

где  $Q_{\text{в}}$  — расход воды на внутреннее пожаротушение л/с  $Q_{\text{н}}$  — расход воды на наружное пожаротушение л/с.

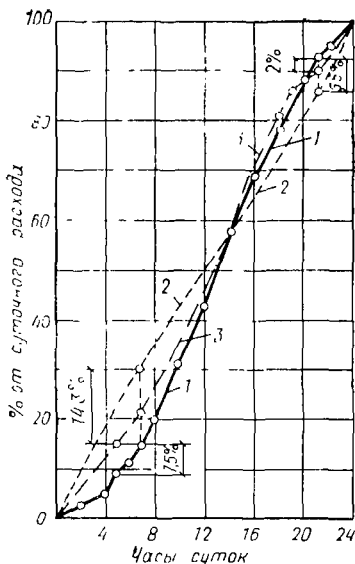


Рис. 38 Интегральный график водопотребления и подачи воды насосами

1 — график водопотребления, 2 — равномерная подача насосов, 3 — неравномерная подача насосов

Запас воды на хозяйственно-питьевые и производственные нужды ( $\text{м}^3$ ) рассчитывают по формуле:

$$W_{\text{пож}}^{10 \text{ мин}} = 0,6 Q_{\text{хоз}}^{\text{макс}},$$

где  $Q_{\text{хоз}}^{\text{макс}}$  — максимальный расход воды на хозяйственно-питьевые и производственные нужды (без учета расхода воды на душ и мойку технологического оборудования) л/с

Для обеспечения надежной подачи воды к потребителям водонапорная башня должна иметь высоту, определяемую из условия создания в «диктующей» точке водопроводной сети требуемого свободного напора при наименьшем уровне воды в баке и рассчитываемую по формуле

$$H_{\text{в б}} = 1,05 h_c + H_{\text{с в}} + (z_{\text{д т}} - z_{\text{в б}}),$$

где  $H_{\text{в б}}$  — высота водонапорной башни от поверхности земли до дна бака 1,05 — коэффициент, учитывающий потери напора на местные сопротивления,  $h_c$  — потери напора в сети по направлению от водонапорной башни до диктующей точки в период наибольшего водопотребления,  $H_{\text{с в}}$  — требуемый свободный напор в диктующей точке,  $z_{\text{д т}}$  и  $z_{\text{в б}}$  — геодезические отметки поверхности земли в диктующей точке и в месте расположения водонапорной башни

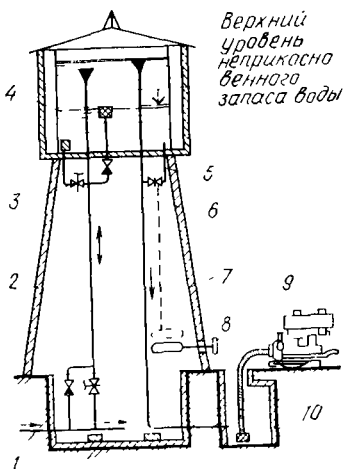
Основными элементами водонапорной башни (рис. 39) являются водонапорный бак и несущая его конструкция.

Водонапорную башню оборудуют таким образом, чтобы обеспечивалось хранение неприкосновенного запаса воды при работе водопровода в обычное время и автоматическое отключение ее при включении пожарных насосов. Подача воды в бак и отбор осуществляются по трубопроводу. По трубопроводу может забираться только регулирующий запас воды. Для отбора неприкосновенного запаса воды используется трубопровод с электрозадвижкой, которая открывается при пуске пожарного насоса. Водонапорный бак снабжен грязевой и переливной трубами, которые соединены с канализационным колодцем. При пожаре водонапорная башня отключается обратным клапаном и электрозадвижкой. К месту пожара вода передвигается пожарным насосом может подаваться из канализационного колодца, для чего с помощью вентиля и муфты открывают задвижку.

Иногда для сохранения неприкосновенного запаса воды на водонапорные баки устанавливают автоматические устройства (например, электронное реле уровня), передающие показания уровней воды в баке на насосную станцию или в диспетчерский пункт.

Водонапорные башни бывают железобетонные, металлические и кирпичные. Наиболее распространены железобетонные водонапорные башни. Металлические водонапорные башни сооружают значительно реже. Водонапорные башни из кирпича сооружают относительно небольшой высоты. По типовым проектам башни сооружают высотой (до дна бака) до 40 м с баками емкостью до 800 м<sup>3</sup>\*. На одной и той же водонапорной башне устанавливают на разной высоте два и даже три бака.

Гидроколонны являются разновидностью водонапорной башни, которая позволяет хранить аварийный запас воды. Она представляет собой железобетонную или стальную цилиндрическую вертикальную емкость, высота которой равна высоте водонапорной башни.



*Верхний уровень неопасно венного запаса воды*

Рис 39 Схема оборудования водонапорной башни

1 — водопровод 2 — стояк для отбора воды 3 — вентиль для включения подачи воды при пожаре 4 — бак водонапорной башни 5 — грязевая труба 6 — переливная труба 7 — ствол 8 — встройство для спуска воды 9 — пожарный передвижной насос 10 — водопроводный колодец

## 10 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЖИМА ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ

При оценке характеристики водообеспечения во время тушения пожаров в городах и на промышленных предприятиях, расположенных в черте города, использовали статистическую информацию о фактическом расходовании воды, которая анализировалась на основе математических методов теории вероятностей. Для описания, объяснения и предсказания процессов водопотребления при тушении пожаров по результатам анализа на-

\* В США и Финляндии широко применяют башни с баками емкостью 5000 м<sup>3</sup> и более.

блудений строили математические модели (теоретические распределения).

Априорные соображения выдвигаемых гипотез проверяли на соответствие эмпирических распределений одному или нескольким теоретическим распределениям (экспоненциальному, Вейбулла, нормальному, Пуассона, логарифмически нормальному). Впоследствии результаты предварительной оценки улучшили путем исключения обнаруженных ошибок и уточнения параметров исходного для анализа материала<sup>1</sup>. В частности, число интервалов (вариант) наблюдений, а также общее число наблюдений при анализе выбирали в зависимости от требуемого размера относительной ошибки  $\delta$  значения  $x$  исследуемой случайной величины с доверительной вероятностью и вида выбранного закона распределения. При этом значение  $\chi^2_{1-\beta} ; 2k$  в расчетах принимали равным 2, что соответствовало отклонению величины в интервале  $2\sigma$ , а доверительная вероятность результата (при нормальном распределении) составляла 0,954. Значение  $\delta=0,05$ , принятое в расчетах, обеспечило точность с погрешностью, не превышающей 5 %.

Программа уточнения вида распределения из числа предполагаемых включала проверку соответствия эмпирических реализаций одному из указанных выше теоретических распределений. Для этого на ЭЦВМ вычисляли константы и параметры функций распределения данного статистического ряда. Распределение принимали, если значения критерия Пирсона удовлетворяли условию

$$0,05\chi^2_{\tau} < \chi^2 < 0,8\chi^2_{\tau},$$

где  $\chi^2_{\tau}$  - табличное значение критерия Пирсона

## Расходы воды для тушения пожаров

Были получены данные о распределении случайной величины расхода воды при тушении пожаров в городах и на промышленных зданиях, размещенных в черте города. Оказалось, что значение квадрата среднего расхода воды для тушения пожаров  $Q^2_*$  (математического ожидания) и дисперсия  $D(Q)$  близки друг другу, по-

<sup>1</sup> Сбор информации, ее обработку и планирование эксперимента выполняли в соответствии с методами, рекомендуемыми ГОСТ 17510—72. «Система сбора и обработки информации. Планирование эксперимента».

этому был принят показательный закон распределения случайной величины, который описан выражением

$$P(Q) = P\{Q \leq Q_n\} = 1 - e^{-Q/Q_*}, \quad (29)$$

где  $P\{Q \leq Q_n\}$  вероятность того, что все значения переменной величины  $Q$  меньше детерминированной величины  $Q_n$  или равны ей.  $Q$  — расход воды для тушения пожара.  $Q_*$  — средний расход воды для тушения пожара (математическое ожидание)

Полученные автором средние значения  $Q_*$  (л/с) приведены ниже

Жилые и общественные здания (высотой до двух этажей) . . . . .	11,24
То же (высотой три этажа и более) . . . . .	18,63
Промышленные здания I и II степеней огнестойкости . . . . .	22,14
То же, IV и V степеней огнестойкости . . . . .	26,05

Кривые интегральной функции распределения случайной величины расхода воды для тушения пожаров (рис. 40) показывают, что в жилых и общественных зданиях повышенной этажности расход воды больше, чем в зданиях с небольшой (до двух этажей) этажностью. Расход воды для тушения пожаров на промышленных предприятиях зависит от степени огнестойкости строительных конструкций. В зданиях со сгораемыми конструкциями (IV—V степень огнестойкости) расход воды больше, чем в зданиях из негорячих строительных конструкций. Предложенная математическая модель достаточно хорошо описывает процесс распределения расхода воды для тушения пожаров.

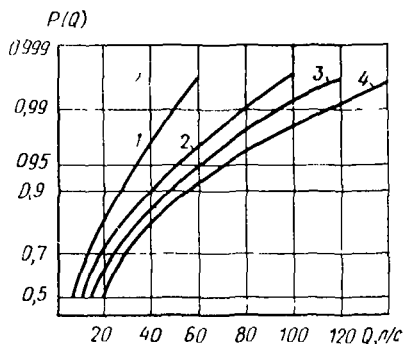


Рис. 40 Кривые интегральной функции распределения случайной величины расходов воды для тушения пожаров

1 — в жилых и общественных зданиях высотой до двух этажей; 2 — то же, высотой свыше двух этажей; 3 — в промышленных зданиях (усредненные данные) I—II степеней огнестойкости; 4 — в открытых технологических установках предприятий химической и нефтехимической промышленности

Анализ фактических расходов воды для тушения пожаров в городах показал, что численность населения не влияет на величину расхода воды, в то время как действующими нормами расход воды установлен в зависи-

мости от численности населения города. В то же время фактический расход воды, наблюдаемый в процессе тушения отдельных пожаров, превышает нормативный расход воды. Это положение в первую очередь относится к расходу воды для тушения пожаров на промышленных предприятиях повышенной пожарной опасности.

## Определение расхода воды

Расход воды для тушения пожаров определяют в зависимости от значения требуемого риска. После преобразований на основании (29) получена формула

$$Q = Q_* \ln \frac{1}{\varepsilon},$$

где  $\varepsilon$  — риск, равный  $1 - P\{Q \leq Q_n\}$  и показывающий вероятность событий, для которых тушение пожаров достигалось при расходе воды большем, чем заданная величина  $Q_n$ , или равном ей

Расход воды по действующим нормам часто оказывается недостаточным для успешного тушения пожара (нормативному расходу воды соответствует недопустимо большой риск 0,11, т. е. в 11 случаях из 100 рассчитанные на пропускную способность 80 л/с системы водоподачи не могут обеспечить подачу требуемого для тушения пожаров количества воды). Для обоснования размера риска автором использован принцип соизмерения выходного эффекта<sup>1</sup> и затрат. Это обусловило выбор иного критерия и разработку нового подхода к определению требуемого расхода воды. В основу алгоритма расчета положены зависимости приведенных (ежегодных) затрат (в пределах заданного диапазона значений риска). При этом переменная часть величины ежегодных затрат на строительство, эксплуатацию и возмещение ущерба от возможных пожаров выражена в виде функции размера риска от пожара.

Капитальные вложения в систему подачи и распределения воды складываются из строительной стоимости водопроводных линий, водопитателей и запасных емкостей. Расход воды для тушения пожара  $Q_n$  оказывает влияние на производительность системы подачи воды, вместимость резервуаров и пропускную способность системы распределения подачи воды, а следовательно, и на

<sup>1</sup> Полезный результат от использования системы водоснабжения в заданный интервал времени.

капитальные затраты. Это влияние оценивалось количеством воды, отбираемой из объединенного производственно-противопожарного водопровода для тушения пожаров в течение года  $W$ , которое составляет незначительную часть повседневного производственного потребления воды:

$$W = 365 \cdot 3600 Q_{\text{п}} \lambda_{\text{т}},$$

где  $\lambda$  — расчетная интенсивность возникновения пожаров в сутки,  $\tau_{\text{т}}$  — средняя продолжительность тушения пожара (математическое ожидание), ч

Капитальные затраты, отнесенные к выполнению водопроводом функций противопожарной защиты (в процентах от общей стоимости системы водоснабжения), в технико-экономическом анализе аппроксимированы эмпирической формулой

$$C_{\text{т}} = a + b N x,$$

где  $C_{\text{т}}$  — капитальные затраты для достижения требований противопожарной защиты (при  $Q_{\text{п}} = Q_{\text{п}}^*$ ),  $a$ ,  $b$ ,  $x$  — параметры, устанавливаемые в результате анализа сметно-финансовых расчетов и укрупненных показателей капитальных затрат,  $N$  — годовая мощность предприятия.

Переменная часть приведенных годовых затрат, отнесенных на пожарные цели для системы производственно-противопожарного водоснабжения (затраты увеличиваются прямо пропорционально  $Q_{\text{п}}$ ) имеет вид:

$$C = m C_{\text{т}} \ln \frac{1}{\varepsilon}.$$

Переменная часть издержек эксплуатации  $\Delta$ , связанных с подачей воды для тушения пожаров ( $Q_{\text{п}} = Q_{\text{п}}^*$ ), выражалась следующим образом:

$$\Delta = p H_{\text{п}} / H_{\text{т}} W,$$

где  $p$  — экономический показатель, характеризующий затраты, связанные с подачей воды (ежегодные отчисления от стоимости насосных станций и годовая стоимость энергии, расходуемой на подъем воды),  $H_{\text{п}}$ ,  $H_{\text{т}}$  — напор насосов при тушении пожара и в условиях повседневной работы

Значение  $p$  определяют по рекомендуемой Н. И. Абрамовым формуле:

$$p = [(a + E_{\text{н}}) f r + 8760 c_{\text{э}} v] / 102 \eta,$$

где  $a$  — нормативный процент амортизационных отчислений от строительной стоимости насосных станций;  $E_{\text{н}}$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $f$  — удельная стоимость насосной станции;  $r$  — коэффициент резерва насосно-силового оборудования;  $C_{\text{э}}$  — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, потребляемой насосной станцией,  $v$  — коэффициент неравномерности расходования электроэнергии на подачу воды в течение расчетного периода времени;  $\eta$  — коэффициент полезного действия.



Переменная часть основных эксплуатационных трат, связанных с увеличением напора и подачи воды стемой при тушении пожаров (затраты возрастают с увеличением  $Q_{II}$ ), выраженная в виде функции размера риска от пожара, определяется зависимостью

$$\Delta = k\Delta_* \ln 1/\varepsilon$$

Переменная часть основных затрат, связанных возмещением последствий от возможных пожаров (траты возрастают с увеличением  $\varepsilon$ ), имеет вид:

$$Y = \Delta Y_* \varepsilon^\beta,$$

где  $\Delta$  — константа, определяемая на основании обработки статистического материала,  $Y_*$  — среднегодовой ущерб для рассматриваемой группы объектов, равный  $\bar{Y}_\lambda$ ;  $\bar{Y}$  — ущерб (средний) от одного пожара,  $\beta$  — параметр устанавливаемый в результате анализа фактических ущербов от пожаров.

Значения  $Y$  и  $\lambda$  определили на основе обработки статистического материала о возможных пожарах и размерах ущерба от них. Автором приняты следующие значения  $Y$  в виде индексов: для административных зданий значение индекса принято равным 1, для производственных зданий (в среднем) — 4,76; для складов — 4

Таким образом, сумма переменных частей приведенных ежегодных затрат, выраженная в виде функции имеет следующий вид:

$$\Pi = mC_* \ln 1/\varepsilon + k\Delta_* \ln 1/\varepsilon + \Delta Y_* \varepsilon^\beta.$$

Значение  $\varepsilon_*$ , соответствующее экстремальному значению (из условия  $d\Pi/d\varepsilon=0$ ), будет равно:

$$\varepsilon_* = [(mC_* + k\Delta_*) / (\beta \Delta Y_*)]^{1/\beta}.$$

После подстановки формулы (30) в выражение  $(d^2\Pi/d\varepsilon^2)$  нетрудно показать, что

$$(mC_* + k\Delta_*) (\beta + 1) > (mC_* + k\Delta_*) \text{ и } d^2\Pi/d\varepsilon^2 > 0 \text{ при } \beta > 0$$

Изложенные здесь свойства экономического функционала зависят от знака величины  $\beta$ . Анализ результатов статистических данных об ущербах от пожаров показывает, что величина  $\beta$  всегда больше 0. Это свидетельствует о том, что  $d^2\Pi/d\varepsilon^2 > 0$  и найденная из уравнения  $d\Pi/d\varepsilon=0$  величина  $\varepsilon_*$  соответствует наименьшему значению функции  $\Pi=f(\varepsilon)$ .

Описанный метод дает возможность установить функциональную связь между последствиями от воздействия

жара и условиями бесперебойности подачи воды для тушения пожаров, а также научно обосновать величину  $\epsilon$  и вместе с этим нормы расходования воды для тушения пожаров.

В результате анализа укрупненных показателей стоимости систем производственно-противопожарного водоснабжения нефтехимического предприятия мощностью 1—3 млн м<sup>3</sup>/год и обработки статистических данных о фактических ущербах от пожаров установлены следующие значения параметров:

Параметр . . . . .	$m$	$C_*$	$\Delta$	$\beta$	$k$	$\epsilon$
Значение . . . . .	0,3	0,67	5	0,5	0,2	0,001

Ниже приведены расчетные значения  $\epsilon_*$  для зданий и сооружений, расположенных в черте нефтехимического предприятия мощностью 1—3 млн м<sup>3</sup>/год, необходимые для расчета норм расходования воды при тушении пожаров.

	$Y_*$	$\epsilon_*$
Административные здания . . . . .	0,2	0,206
Производственные здания (усредненные данные)	0,95	0,095
Склады . . . . .	0,89	0,098

Использование предлагаемого метода при проектировании систем подачи и распределения воды, работающих в режиме пожаротушения, позволяет обеспечить требуемую бесперебойность подачи воды для тушения пожаров при наименьших приведенных затратах.

## 11. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОПРОВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ

При проектировании комплекса водопроводных сооружений необходимо в соответствии с действующими требованиями СНиП определить численные характеристики сооружений (водопитателей, водоводов, водопроводных сетей и сооружений для хранения и регулирования подачи воды), которые должны обеспечить выполнение «заданных функций» при минимальных приведенных затратах на строительство и эксплуатацию. Параметры водопроводных сооружений рассчитывают на основе предельных (пиковых) нагрузок (заданного количества потребляемой воды, режима ее потребления и требуемого

давления в сети) с учетом требований и условий водообеспечения передвижной пожарной техники. К ним относятся:

подача требуемого количества воды под заданным напором в наиболее удаленные от водопитателя расчетные точки водопроводной сети;

обеспечение бесперебойной подачи воды;

использование стандартного оборудования при возведении водопроводных сооружений (труб, насосов, устройств отбора воды на противопожарные нужды).

Решение задачи сводится к выбору схемы водоснабжения, определению диаметров всех линий водопроводной сети, подбору соответствующих водопитателей и назначению режима работы комплекса водопроводных сооружений с учетом условий бесперебойной подачи воды для тушения пожаров и соответствия минимуму приведенных затрат.

В соответствии с требованиями норм строительного проектирования параметры водопроводных сооружений системы водоснабжения рассчитывают на расход воды, представляющий собой сумму максимального расхода воды всеми потребителями (на хозяйственно-питьевые, бытовые, общественные, производственные и пожарные) в часы и сутки максимального потребления воды. В связи с этим ответственным этапом расчета является определение параметров, характеризующих режимы водопотребления при отборе воды для тушения пожаров. Завышение расчетных параметров приводит к снижению эффективности капиталовложений, занижение — к увеличению ущерба от возможных пожаров в результате нарушения нормального водообеспечения. Эффект водоснабжения (при отборе воды для тушения пожаров) зависит от того, насколько точно рассчитаны показатели, определяющие четкость, устойчивость и надежность работы комплекса водопроводных сооружений. Требования норм основаны на использовании детерминированных значений (потребность в воде, продолжительность отбора, одновременность пожаров и др.), причем расчет системы из условия «подачи полного расчетного расхода на тушение пожаров» при «наибольшем часовом расходе воды на другие нужды» — приближенный и имеет существенные недостатки. В связи с этим важно прогнозировать процесс водопотребления, который позволит заблаговременно предсказать график потребления воды и упорядочить вопросы бесперебойной ее подачи.

В работах автора, посвященных вопросам оценки качества функционирования систем противопожарного водоснабжения и анализу стохастической природы потребления воды для тушения пожаров, комплексно описан прогноз процесса водоснабжения с помощью аналитических моделей, построенных на основе обработки вероятностно-математическими методами статистической информации о случайном процессе потребления воды. Указанная концепция положена в основу совершенствования методов расчета систем противопожарного водоснабжения вообще и вопросов научно обоснованного прогнозирования бесперебойной подачи воды в частности. Это позволило предсказать вероятность нарушений или срывов водообеспечения и предусматривать мероприятия для гарантированной их ликвидации, обеспечения устойчивой работы каждого сооружения и повышения надежности системы водоснабжения в целом. Для достижения поставленной цели прежде всего необходимо выявить общие свойства и особенности работы системы противопожарного водоснабжения при воздействии случайных факторов.

Общая схема вычисления параметров водопотребления при отборе воды включает четыре этапа. Первый этап — классификация потребителей по степени бесперебойности обеспечения их водой. Второй — построение расчетной модели суммарного водопотребления и вычисление ее параметров и констант. Третий — установление требуемого уровня бесперебойной подачи воды и определение с помощью построенной модели суммарного (расчетного) расхода воды. Четвертый этап расчета — построение расчетной модели и установление параметров для определения продолжительности и одновременности подачи воды и продолжительности восстановления израсходованных во время пожара запасов воды.

Расчет с использованием жестко детерминированных настоящими нормами режимов водопотребления не является безукоризненным, так как в нем не учитываются возможная (нефиксированная) водоотдача системы на противопожарные нужды и существенное воздействие внутренних и внешних случайных факторов. Поэтому целесообразно пересмотреть действующие в настоящее время принципы расчета параметров, характеризующих технические состояния системы подачи и распределения воды. Для решения перечисленных выше задач была выявлена степень влияния требований противопожарного

водообеспечения на параметры водопроводных сооружений, представляющая собой отношение расчетного расхода воды для тушения пожаров  $q_{п}$  к хозяйственно-питьевому расходу воды  $q_x$  при повседневной работе системы.

### **Влияние требований противопожарного водообеспечения на параметры водопроводных сооружений**

Влияние требований противопожарного водообеспечения<sup>1</sup> на параметры водопроводных сооружений и технико-экономические показатели системы водоснабжения обусловлено в основном численностью населения. Анализ вариантов систем водоснабжения, обслуживающих населенные пункты с различной численностью населения, показал, что влияние требований пожарного водообеспечения на затраты зависит от величины  $\varphi = 1 + q_{п}/q^N_x$  и  $\varphi' = q_{п}/q_x$  (где  $q_x$  — расход воды на хозяйственно-питьевые нужды в сутки наибольшего водопотребления;  $q^N_x$  — то же, в час наибольшего водопотребления). Для сопоставления технико-экономических показателей вариантов систем противопожарного водоснабжения капитальные вложения  $C_{п}$  на удовлетворение требований противопожарного водообеспечения (в процентах от общих затрат на систему водоснабжения  $C$ ) выражались также в зависимости от численности населения города  $N$  и нормы потребления воды на одного жителя в сутки  $q_*$ ,  $C_{п} = f(N; q_*)$ . Наиболее удобным для математической обработки и достаточно точным выражением функции явилось степенное уравнение  $C_{п} = A + B\varphi^y$ , которое после логарифмирования, замены переменных [ $x = \lg \varphi$  и  $y = \ln(C_{п} - A)$ ] и соответствующих математических преобразований, приводилось к уравнению прямой  $y = \lg B + \gamma x$ . Параметры степенной функции получены на основе анализа сметно-финансовых расчетов и укрупненных показателей стоимости водопроводных сооружений различной производительности. Технико-экономические показатели систем водоснабжения приведены в табл. 15.

---

<sup>1</sup> Требования к устройству водоводов, водопроводных сетей, к резервированию насосно силового оборудования, объему неприкосновенного запаса воды в резервуарах и водонапорных башнях и к размещению пожарных гидрантов на водопроводной сети.

Таблица 15. Техничко-экономические показатели систем водоснабжения

Численность населения тыс. чел.	Противопожарный расход воды, л/с	Расход в л/с на хозяйственно-питьевые нужды, л/с			$\frac{q_{\text{л}} - q_{\text{п}}}{q_{\text{л}}}$	$\frac{q_{\text{л}} + q_{\text{п}}}{q_{\text{л}}}$	$C_{\text{п}}, \%$	$C_{\text{п}}, \%$	$C'_{\text{п}} - C_{\text{п}}$
		$q_{\text{л}}$	$q_{\text{п}}$	$q_{\text{л}}^{\text{м}}$					
5	10	20	21	28	1,5	1,38	38,4	32,2	6,2
10	15	40	42	52	1,45	1,29	32,2	26,2	6
50	50	197	210	200	1,32	1,19	23,1	19,8	3,3
100	70	395	420	520	1,24	1,13	19,3	12,5	6,8
200	120	790	840	1000	1,22	1,12	17,1	12	5,1

<sup>1</sup> Норма среднесуточного водопотребления (за год) на 1 жителя принята равной 340, в сутки наибольшего водопотребления — 360, в час наибольшего водопотребления — 450 л/сут.

Для интервала  $5 \leq N \leq 300$  ( $N$ , тыс.) капитальные затраты  $C_{\text{п}}$  и  $C'_{\text{п}}$  аппроксимированы

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{п}} &= q^4 - 5,1; \\ C'_{\text{п}} &= 1,8 + 1,1q^3. \end{aligned} \right\}$$

Результаты обработки данных технико-экономического анализа выражены графически на рис. 41 и 42.

Значение  $C_{\text{п}}$  зависит не только от численности населения, но и от нормы водопотребления и коэффициента его неравномерности  $k$ . Следует отметить принципиальное различие при определении значения  $k$  для гидравлических расчетов систем подачи и распределения воды

Население, тыс. чел.	Затраты По данным табл. 15	
5	77	38,4
10	80	32,2
50	32	23,1
100	23	19,3

Из результатов исследований видно, что требования противопожарного водообеспечения перестают оказывать влияние на параметры резервуаров и насосных станций по мере уменьшения величины  $\varphi$ . При значениях  $\varphi$ , близких единице, противопожарные требования влияют лишь на характеристику водопроводных сетей. Дополнительные затраты (около 8—10%) отнесены на

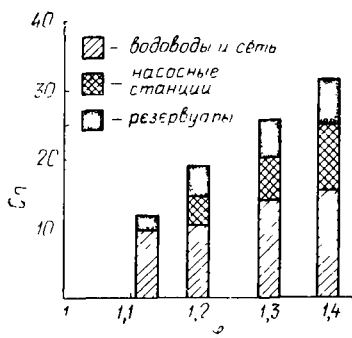
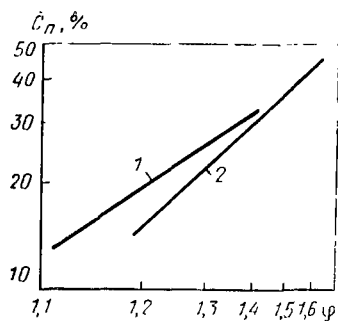


Рис. 41. Зависимость капитальных затрат на выполнение требований противопожарного водообеспечения от величины  $\phi$   
 1 — при расчете системы на максимальное водопотребление (в часы суток наибольшего водопотребления); 2 — при расчете системы на максимальное суточное водопотребление

Рис. 42. Распределение капитальных затрат на удовлетворение требований противопожарного водообеспечения между основными сооружениями системы водоснабжения

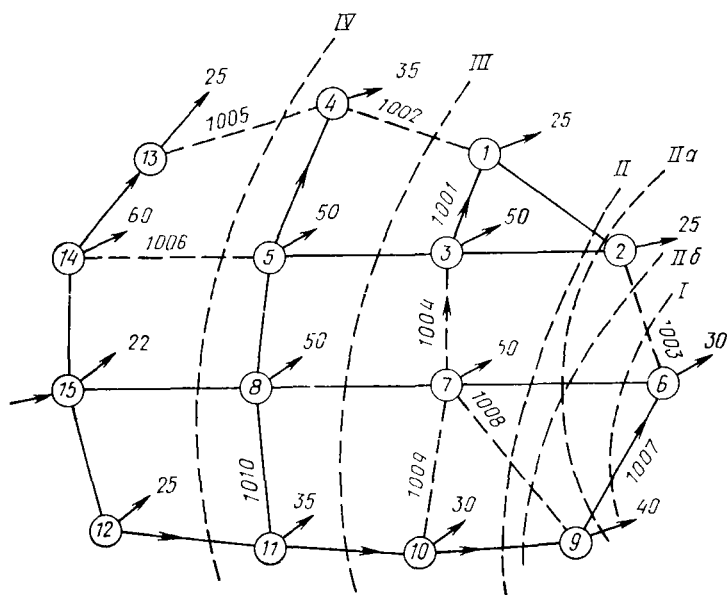


Рис. 43. Расчетная схема водопроводной сети

сплошные линии — «дерева сети»; пунктирные — «независимые линии», имеющие порядковые номера с добавлением 1000; числа в кружках — номера узлов; числа рядом с узлами — узловые отборы воды, л/с; римские цифры — номера сечений, выделяющих группы узлов

установку пожарных гидрантов и аварийных задвижек, увеличение диаметров водопроводных линий и прокладки дополнительных участков сети. В табл. 16 приведены результаты технико-экономического анализа для кольцевой водопроводной сети (рис. 43) системы водоснабжения города при  $N=100$  тыс. чел.,  $q^M_x=552$  л/с.

При анализе рассмотрены варианты подачи воды на случай противопожарного водообеспечения  $q^M_x+q_{II}$  и повседневной подаче воды  $q^M_x$ <sup>1</sup>. При повседневном хозяйственно-питьевом потреблении воды численность населения, получающего воду от той или иной группы узлов, определена по формуле

$$N_{II} = N \Sigma q_y / q,$$

где  $N_{II}$ ,  $q$  — общая численность населения, обслуживаемого данной системой, и расчетный расход воды, поступающей в сеть;  $\Sigma q_y$  — суммарный отбор воды из линий, входящих в выделенное сечение.

Ниже приведены данные о капитальных затратах (%) для реализации требований противопожарного водообеспечения:

Таблица 16. Технико-экономические показатели водопроводной сети

Сечение	$\Sigma q_y$ , л/с	$N \frac{\Sigma q_y}{\Sigma q}$	$q_{II}$	$1 + \frac{q_{II}}{\Sigma q_y}$	$\frac{S_{II}}{S} = \varphi_{II}$	$\frac{d_{II}}{d} = \varphi \frac{n}{m}$	$C_{II}/C$
I	30	5,25	15	3,28	10,6	1,49	1,79
II	95	16,6	15	1,94	3,8	1,25	1,45
III	250	43,7	50	2,14	4,6	1,67	2,38
IV	420	73,4	70	1,95	3,8	1,56	2,14
II-а	55	9,61	15	2,56	6,5	1,87	2,88
II-б	100	12,2	15	2,23	5,0	1,72	2,51

Требования противопожарного водообеспечения оказывают большое влияние на «второстепенные» линии водопроводных сетей (см. табл. 16), поскольку величина гидравлического сопротивления водопроводных линий (для разновеликих потерь напора) при противопожарном водопотреблении увеличивается в  $\varphi_{II}$  раз ( $n$  — показатель степени в формуле  $h = sq^n$  для определения потерь напора).

<sup>1</sup> Технико-экономические показатели определены по алгоритмам и программам, разработанным ВНИИ ВОДГЕО и ГПИ Союзводоканалпроект.



Исходя из эмпирических закономерностей определены значения  $d_{п}/d$ , показывающие увеличение диаметров водопроводных сетей, и  $C_{п}/C$ , выражающие увеличение их стоимости в результате дополнительной подачи воды на противопожарные нужды.

Полученные результаты позволяют оценить эффективность капитальных вложений и выбрать экономически наиболее выгодные варианты проектных решений систем противопожарного водоснабжения.

## Потребление воды при тушении пожаров

Закономерности случайного процесса водопотребления для тушения пожаров наиболее достоверно могут охарактеризовать численные значения норм водообеспечения. Требования норм основаны на использовании детерминированных значений переменных (потребность в воде, продолжительность отбора, одновременность отбора воды). Недостатками существующих норм являются также неудачная трактовка требования подачи полного расчетного расхода воды; отсутствие требований к бесперебойному снабжению водой, сформулированных на основе математической модели случайного процесса водообеспечения. Результаты многих исследований показывают, что процесс водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды характеризуют случайные величины. Изменение водопотребления по годам связано, главным образом, с увеличением численности населения и повышением степени благоустройства жилищ. Рост хозяйственно-питьевого водопотребления в населенных местах показан на рис. 44. Интегральная функция распределения хозяйственно-питьевого водопотребления, изменяющегося по годам, приведена на рис. 45. Сезонные колебания водопотребления определяют миграция населения и климатические факторы. Суточные и часовые изменения расхода воды являются результатом неравномерности водопотребления, вызванной сложившимся укладом жизни города или предприятия. Данные наблюдений показывают, что процессы колебания водопотребления могут быть описаны типичными рядами динамики, состоящими из тенденции (тренда), сезонной и случайной компонент,

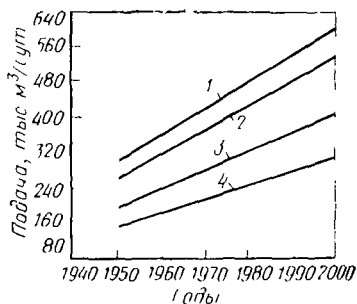


Рис 14 Рост хозяйственно-питьевого водопотребления населенных мест

1 — в сутки максимального водопотребления (при вероятности возможного превышения, равного не более одного раза в 10 лет), 2 — то же (при вероятности возможного превышения не более одного раза в 1 год), 3 — среднесуточное (за год) водопотребление, 4 — минимальное водопотребление

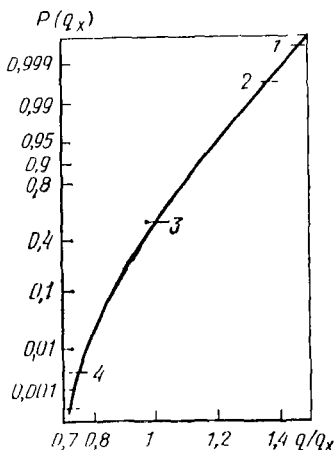


Рис 15 Интегральная функция распределения хозяйственно-питьевого водопотребления, изменяющегося по годам

1, 2, 3 и 4 — соответствуют обозначениям рис. 14

Для оценки требуемой вероятности обеспечения водой пожарной техники, отбирающей воду из коммунальных систем водоснабжения, необходимо иметь интегральную функцию распределения и плотность распределения суммы независимых случайных величин потребления воды на хозяйственно-питьевые и противопожарные цели. Автором дано математическое описание процесса водопотребления и предложен метод расчета величины расхода воды, основанный на вероятностных характеристиках водообеспечения. Суть разработанного метода заключается в следующем. Случайный процесс потребления воды для тушения пожаров протекает на фоне изменяющегося во времени хозяйственно-питьевого водопотребления. Именно поэтому исходной предпосылкой для расчета надежного водообеспечения при отборе экстремальных расходов воды из многофункциональных систем водоснабжения служит композиция законов распределения (закон распределения суммы независимых случайных величин  $q_x$  и  $q_n$ ). При этом следует отметить, что величина  $q_x$  распределена по нормальному закону  $n(q_x)$ ,  $q_n$  — по экспоненциальному  $e(q_n)$ .

Плотность распределения случайной величины (как плотность вероятности суммы независимых величин) представляет собой свертку  $n(q_x)$  и  $e(q_n)$ :

$$P(q) = \int_{-\infty}^{+\infty} n(q_x) e(q - q_x) dq_x.$$

Поскольку подынтегральная функция отлична от нуля только при  $0 \leq q_x \leq q$ , то

$$P(q) = \begin{cases} \int_0^q n(q_x) e(q - q_x) dq_x & \text{для } q \geq 0, \\ 0 & \text{для } q < 0. \end{cases} \quad (31)$$

Преобразуя (31) с учетом экспоненциального закона распределения величины  $q_n = q - q_x$ , получим

$$P(q) = \int_0^q n(q_x) \frac{1}{q_n} e^{-(q - q_x)/q_n} dq_x = \frac{1}{q_n} e^{-q/q_n} \int_0^q n(q_x) e^{q_x/q_n} dq_x.$$

Введя новую переменную  $z$ , интегральную функцию распределения суммы независимых случайных величин для значений  $q \geq 0$  представим в виде

$$P(q) = \int_0^q P(z) dz = \int_0^q \left[ \frac{1}{q_n} e^{-z/q_n} \int_0^z n(q_x) e^{q_x/q_n} dq_x \right] dz. \quad (32)$$

Принимая во внимание, что

$$\frac{1}{q_n} \int_0^q e^{-q_x/q_n} dq_x = - \int_0^q d e^{-q_x/q_n} = [e^{-q_x/q_n}]_0^q,$$

выражение (32) приводим к виду:

$$P(q) = - \int_0^q \left[ \int_0^z n(q_x) e^{q_x/q_n} dq_x \right] d e^{-z/q_n}. \quad (33)$$

Интегрирование (33) в пределах от 0 до  $q$  дает

$$P(q) = \left[ e^{-z/q_n} \int_0^z n(q_x) e^{q_x/q_n} dq_x \right]_{z=0}^{z=q} + \\ + \int_0^q e^{-z/q_n} n(z) e^{-z/q_n} e^{-z/q_n} dz.$$

Учитывая, что первое слагаемое представляет собой  $\int_0^q n(z) dz$ , а второе —  $\bar{q}_n P(q_x)$ , получим выражение интегральной функции распределения суммы независимых величин  $q_x$  и  $q_n$ , которое является одновременно алгоритмом для расчета на ЭЦВМ:

$$P(q) = \int_0^q n(z) dz - \bar{q}_n P(q).$$

Плотность и интегральная функция распределения случайной величины  $q_x$  выражают формулой

$$\begin{cases} n(q_x) = -P'(q_x)/P(q_x); \\ P(q_x) = 1 - 1/\sigma \sqrt{2\pi} \int_0^{q_x} e^{-\frac{(q_x - \bar{q}_x)^2}{2\sigma^2}} dq_x. \end{cases} \quad (34)$$

Вводя под знаком интеграла новую переменную  $t = (q_x - \bar{q}_x)/(\sigma\sqrt{2})$ , получим

$$P(q_x) = 1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\bar{q}_x/\sigma\sqrt{2}}^{(q_x - \bar{q}_x)/\sigma\sqrt{2}} e^{-t^2} dt,$$

что даст

$$P(q_x) = 1 - \frac{1}{2} [\Phi(q_x - \bar{q}_x)/\sigma\sqrt{2} + \Phi(\bar{q}_x/\sigma\sqrt{2})]. \quad (35)$$

Поскольку  $\bar{q}_x \geq \sigma$ , то  $\Phi\left(\frac{\bar{q}_x}{\sigma\sqrt{2}}\right) \cong 1$ . Тогда выражение (35) можно записать следующим образом:

$$P(q_x) = 0,5 [1 - \Phi(q_x - \bar{q}_x)/\sigma\sqrt{2}]. \quad (36)$$

Подставляя выражение (36) в (34), после преобразований получим выражение для определения плотности распределения расходов воды на хозяйственно-питьевые нужды:

$$n(q_x) = \begin{cases} 0, & \text{если } q_x < 0. \\ \frac{\exp\left[-\frac{(q_x - \bar{q}_x)^2}{2\sigma_x^2}\right]}{\sigma\sqrt{\pi/2} \int_0^{q_x} \exp\left[-\frac{(q_x - \bar{q}_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] dq_x}, & \text{если } q_x \geq 0, \end{cases}$$

Плотность распределения расхода воды на противопожарные нужды была описана показательным законом

$$e(q_n) = \begin{cases} 0, & \text{если } q_n < 0, \\ \bar{q}_n^{-1} \exp(-q_n/\bar{q}_n), & \text{если } q_n \geq 0. \end{cases}$$

Исходными данными для определения значений  $\bar{q}_x$  и  $\sigma_x$  служили коэффициенты неравномерности, приведенные в табл. 5. На основании изложенных выше результатов обработки статистической информации на ЭЦВМ определены значения  $\bar{q}_x$  и  $\sigma_x$  для расходов  $q_x$  в диапазоне 15—1250 л/с.

Ниже приведены результаты обработки данных и значения коэффициента неравномерности водопотребления  $k = q_x/\bar{q}_x$  при  $N(q_x) = 0,99$ :

$q_x$ , л с . . . . .	50	100	200	500	800	1250
$\sigma_x$ . . . . .	0,227	0,194	0,177	0,142	0,122	0,097
$k$ . . . . .	1,68	1,58	1,53	1,42	1,35	1,3

Как видно, неравномерность водопотребления уменьшается по мере увеличения  $\bar{q}_x$  (численности населения) и зависит от величины  $N(q_x)$ . Вместе с этим следует отметить удовлетворительное согласование полученных результатов с данными СНиП.

Население, тыс. чел. . . . .	10	20	40	100	160	250
$\alpha$ . . . . .	1,5	1,33	1,21	1,2	1,2	1,2
$\beta$ . . . . .	1,3	1,2	1,15	1,1	1,07	1,05
$k_{ч. макс} = \alpha \beta$ . . . . .	1,8	1,6	1,4	1,32	1,28	1,26

Значения  $S(q)$  вычислены на ЭЦВМ для населенных мест при тушении пожаров в зданиях (жилье, общественные и промышленные) с различными параметрами водообеспечения. Результаты вычислений интегральной функции распределения суммы независимых величин водопотребления на хозяйственно-питьевые и противопожарные цели представлены на рис. 46. Из графиков видно влияние величины  $\bar{q}_n$  на характеристику хозяйственно-питьевого водопотребления при  $q_x = 15—100$  л/с (см. рис. 46, а, б, в). При значительном расходе воды на хозяйственно-питьевые нужды (см. рис. 46, г, д, е) это влияние становится менее заметным. Описанный метод расчета позволяет определять с помощью ЭЦВМ коэффициенты неравномерности часового потребления воды в зависимости от среднечасового расхода воды в населенном месте  $\bar{q}_x$  (или соответствующего ему среднеквад-

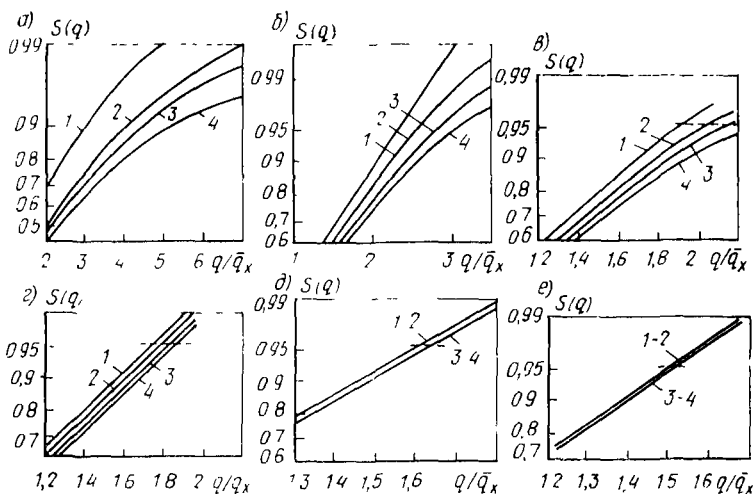


Рис 46 Интегральная функция распределения суммы независимых величин в водопотреблении на хозяйственно-питьевые и противопожарные цели

а -  $\bar{q}_x = 15$  б -  $\bar{q}_x = 50$  в -  $\bar{q}_x = 100$  г -  $\bar{q}_x = 200$ , д -  $\bar{q}_x = 500$ , е -  $\bar{q}_x = 800$  л/с  
 1 -  $\bar{q}_п = 11,24$ , 2 -  $\bar{q}_п = 18,73$ , 3 -  $\bar{q}_п = 22,14$ ; 4 -  $\bar{q}_п = 26,05$  л/с

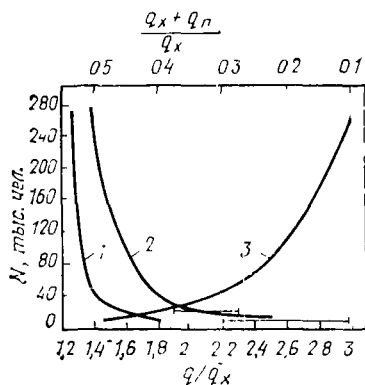


Рис 47 Зависимость коэффициента неравномерности водопотребления от численности населения

1 - неравномерность хозяйства по питьевому водопотреблению, 2 - неравномерность суммарного водопотребления (хозяйственно-питьевого и противопожарного) 3 - уменьшение водопотребления при исключении пожарного расхода воды

ратического отклонения) и математического ожидания противопожарного расхода воды  $\bar{q}_п$  для требуемой степени (вероятности) обеспечения бесперебойной подачи воды. На основании полученных данных построена зависимость коэффициента неравномерности водопотребления от численности населения (рис. 47).

## Процесс отбора воды при тушении пожаров

Рассмотрим наиболее распространенный вариант многофункциональной системы водоснабжения (рис. 48), в которую входят водоисточник, водопитатель, система распределения, система управления водоподачи и водоразборные устройства для отбора и подачи воды на противопожарные нужды. Система водоснабжения состоит из большого числа элементов, обеспечивающих потребителей заданным количеством воды. Можно выделить группу элементов, свойства которых необходимо учитывать при проектировании системы водоснабжения. Если противопожарное водоснабжение рассматривать как сложную систему с точки зрения интенсивности подачи воды для тушения пожаров, пропускной способности водопитателей и распределительной системы, а также оптимального регулирования водоподачи и распределения воды при возникновении пожара, то в этом случае элементами сложной системы будут водоисточник, водопитатель и подсистемы распределения воды и управления ее подачей. Здесь возникают вопросы предварительного создания необходимых запасов воды в водоисточнике, обеспечивающем нормальную работу водопитателя и системы распределения воды, а также проблемы, связанные с нормальным и своевременным управлением большим числом взаимосвязанных и взаимодействующих элементов системы. При расчете системы водоснабжения, помимо расхода воды для тушения пожаров, необходимо определить продолжительность подачи воды для тушения пожара, частоту возникновения и вероятность одновременного возникновения пожаров и т. д.

Работа системы водоснабжения аналогична работе системы массового обслуживания, которая должна бесперебойно подавать воду для тушения пожаров (в любое время суток). Под обслуживанием в данном случае принимается удовлетворение системой поступающих в нее требований (заявок). Система противопожарного водоснабжения — обслуживающая система, заявки — требования на отбор воды для тушения пожаров в виде временной последовательности (входящего потока). Особенность задач теории массового обслуживания — случайный характер изучаемых явлений: длительность обслуживания и интервалов между поступающими требованиями. Работа системы построена следующим образом: в случайный момент времени поступает требование

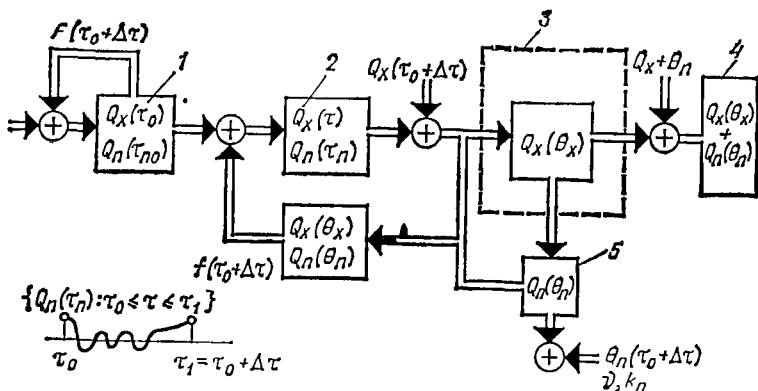


Рис 48. Структура сложной многофункциональной системы водоснабжения

1 — водонсточник, 2 — водопитатель, 3 — система распределения, 4 — система управления водоподачей; 5 — водоразборные устройства;  $Q_X(\tau_n)$  и  $Q_X(\tau)$  — водопотребление на хозяйственно-питьевые цели в моменты времени  $\tau_0$  и  $\tau$  соответственно  $Q_n(\tau_0)$  и  $Q_n(\tau_n)$  — потребность в воде при тушении пожара в моменты времени  $\tau_0$  и  $\tau_n$  соответственно  $Q_X(\tau_0 + \Delta\tau)$  — параметр, характеризующий режим водопотребления при пожаротушении (состояние системы в момент времени  $\tau_0 + \Delta\tau$ );  $Q_n(\tau_0 + \Delta\tau)$  — стохастический параметр, характеризующий режим водопотребления (состояние системы) при пожаротушении,  $\{Q_n(\tau_n) \cdot \tau_0 \leq \tau \leq \tau_1\}$  — реализация точечной оценки процесса водопотребления при пожаротушении.

обеспечить тушение возникшего пожара водой, которое выполняется во время тушения пожара, после чего система приводится в готовность для последующей работы.

Работа системы водоснабжения характеризуется своеобразными случайными процессами, связанными с переходами этой системы из одного состояния в другие: подача заданного расхода воды при тушении пожара в течение определенного времени, а затем восстановление израсходованных запасов воды и приведение системы в состояние готовности и ожидания перед очередным включением на противопожарные нужды. Работу системы водоснабжения при тушении пожара характеризует поток требований, который определяют следующие показатели: потребность в воде (расход)  $Q_n$ ; продолжительность отбора воды  $\tau_n$ ; частота отборов  $\nu$ ; одновременное число отборов  $m$ ; неравномерность частоты отборов  $k_n$  и характера водопотребления  $k_B$ . Таким образом, задача исследований процесса отбора воды для тушения пожаров сводится к определению численных значений этих показателей.



## Поток заявок на отбор воды для тушения пожаров

Основным фактором, обуславливающим процесс, протекающий в системе массового обслуживания, является поток требований, т. е. последовательность возникающих один за другим пожаров. Поэтому первоочередной задачей исследования системы подачи и распределения воды для тушения пожаров, рассматриваемой с позиции теории массового обслуживания, является изучение потока требований, которые могут поступить в результате возникновения пожаров. В данном случае под потоком требований понимают последовательность возникновения пожаров в какие-то случайные моменты времени. Функционирование пожарной службы города описывается математической моделью, на основании которой определяют число одновременных вызовов пожарных подразделений и продолжительность их занятости. Подобный подход был положен в основу построения математической модели функционирования системы противопожарного водоснабжения, рассматриваемой с позиции теории массового обслуживания. Для количественного анализа процесса «обслуживания» требований был проанализирован поток поступающих требований и исследованы его характеристики. Анализ показал, что поток требований, поступающих в систему и представляющих собой последовательность заявок на отбор воды для тушения пожаров, не является стационарным, поскольку параметр потока зависит от времени суток и сезонов года. В то же время процесс отбора воды в сравнительно ограниченные промежутки времени приближается к стационарному. С учетом этого положения принято, что поток требований, поступающих в систему, является простейшим. Эта гипотеза была проверена при анализе статистических данных о пожарах с привлечением аппарата теории вероятностей и теории массового обслуживания. Обработка наблюдений позволила выявить закономерности статистического распределения частоты возникновения пожаров и определить частоту повторения отбора воды при тушении пожаров. Было выявлено, что среди множества факторов, влияющих на число пожаров в сутках, наиболее существенными оказались в городах и сельских населенных местах — численность населения; в промышленных зданиях (определенной категории по-

жарной опасности) — объем производства или годовая производительность.

Зависимость  $v$  от характерного фактора, а также значения констант и параметров устанавливали на основе корреляционного и регрессивного анализа характера корреляционного поля. Степень взаимосвязи между переменными выражена коэффициентом корреляции, а достоверность полученных результатов оценена критерием Фишера. Анализ обработки статистических данных позволил установить, что среднее значение  $\bar{v}$  может быть аппроксимировано зависимостью степенного вида

$$\bar{v} = ax^n + b,$$

где  $a$ ,  $b$  и  $n$  — константы и параметр корреляционной зависимости  $x$  — численное значение характерного фактора.

Результаты корреляционного и регрессивного анализа частоты отборов воды из водопровода при тушении пожаров приведены в табл. 17.

Таблица 17. Константы и параметры корреляционной зависимости частоты отбора воды при тушении пожара

Объекты	1 д. изм. характерного фактора	1 д. изм.	$a$	$b$	$n$
Городские населенные места	млн. чел.	ч <sup>-1</sup>	0,605	0,31	0,98
Сельские населенные места	»	»	0,71	0,42	0,99
Промышленные здания					
категория А	тыс. м <sup>3</sup>	год <sup>-1</sup>	4,13	0,51	0,91
Б	»	» <sup>-1</sup>	2,32	0,42	0,96
В	»	» <sup>-1</sup>	1,02	0,67	0,98

Частота пожаров, определяющая характер отбора воды из водопроводов, колеблется в течение часов и суток. На рис. 49 показана неравномерность отбора воды из городских водопроводов. Наибольший интерес для расчета систем водоснабжения представляют те часы суток, которым соответствует наибольший отбор воды для хозяй-

<sup>1</sup> Частота пожаров, для тушения которых требовалось включение водопроводов, в 3 раза меньше частоты вызовов пожарных подразделений, так как в общее число вызовов входят ложные вызовы, а также случаи тушения пожаров без использования систем водоснабжения.

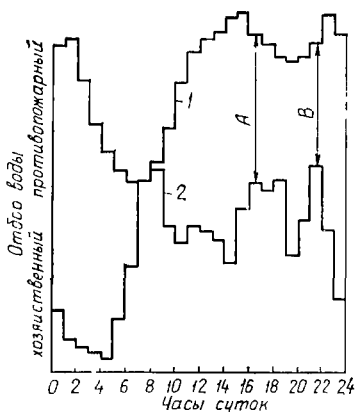
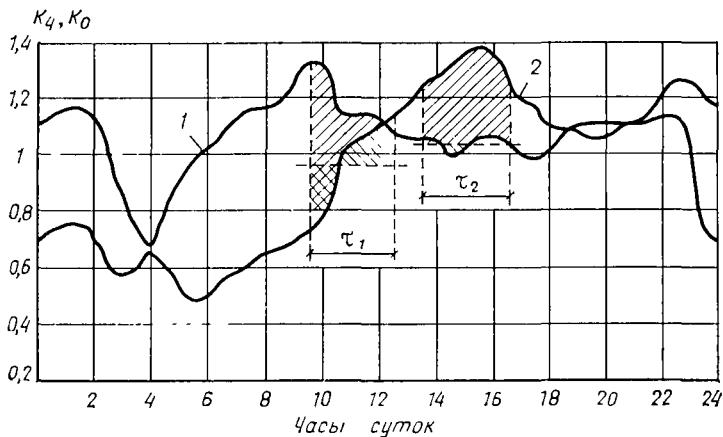


Рис. 49. Неравномерность отбора воды из городских водопроводов

1 — противопожарный; 2 — хозяйственно-питьевой

Рис. 50 Коэффициент неравномерности хозяйственно-питьевого водопотребления ( $k_n$ ) и коэффициент неравномерности частоты отбора воды ( $k_o$ ) для тушения пожаров по часам суток

1 — хозяйственно-питьевое водопотребление 2 — для тушения пожаров



ственно-питьевых и противопожарных целей. Эти значения отмечены отрезками А и В. Часы максимального хозяйственно-питьевого отбора не соответствуют часам максимальной частоты отбора воды для противопожарных целей. Характер колебаний частоты отбора воды для тушения пожаров оценен коэффициентом часовой неравномерности колебаний  $k_n$ . Для сравнения на рис. 50 показаны коэффициент неравномерности хозяйственно-питьевого водопотребления и коэффициент неравномерности частоты отбора воды для тушения пожаров по часам суток. Эти данные показывают, что в отдельные часы суток (например, с 15 до 16 ч) пожары возникают

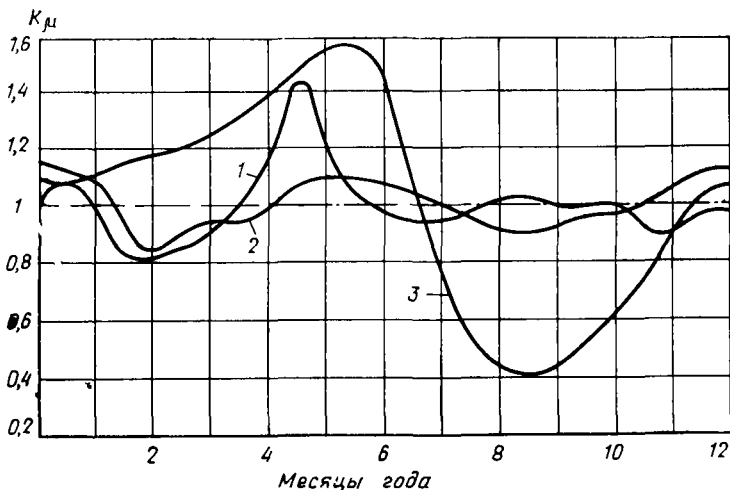


Рис. 51. Коэффициенты неравномерности частоты отборов воды для тушения пожаров  
 1 — общественные и жилые здания, 2 — промышленные здания, 3 — сельская местность

чаще (частота пожаров на 38% превышает среднюю), а в другие часы суток (например, с 6 до 7 ч) частота уменьшается в 2 раза с лишним по сравнению со среднечасовой. Отрезками  $\tau_1$  и  $\tau_2$  показаны трехчасовые интервалы, соответствующие расчетным режимам общего потребления воды на хозяйственно-питьевые и противопожарные цели.

Неравномерность частоты пожаров отмечена в течение месяца и года и обусловлена влиянием метеорологических условий, вводом в действие систем отопления, изменением интенсивности освещения и работы производственных объектов в течение года и рядом других факторов. Коэффициенты неравномерности частоты пожаров по месяцам года для различных по характеру объектов представлены на рис. 51. Эти данные показывают, что в отдельные месяцы года частота пожаров увеличивается на 38% по сравнению со среднемесячной. Неравномерность суточных и сезонных колебаний частоты отбора воды учтена по часам суток расчетного дня и рассматриваемого сезона года. Установлено, что частота, с которой группируются отклонения от  $\nu$ , распределяется по нормальному закону и с увеличением  $\nu$  относительные колебания, выраженные коэффициентом

вариации  $\sigma$ , уменьшаются. Результаты обработки статистических данных о колебании коэффициентов неравномерности отбора воды по часам суток расчетного дня  $\kappa_{\text{ч}}$  и суткам расчетного сезона (месяца)  $\kappa_{\text{м}}$  показывают, что значения  $\kappa_{\text{ч}}$  [при  $P(\kappa) = 0,99$ ] составляют для городов 1,38; сельских населенных мест — 1,43; промышленных предприятий — 1,19. Значения  $\kappa_{\text{м}}$  [при  $P(\kappa) = 0,99$ ] составляют для городов 1,38; сельских населенных мест — 1,45; промышленных предприятий — 1,2.

Статистическая обработка данных о пожарах на предприятиях химической и родственных ей отраслях промышленности показала, что среднее значение частоты возникновения пожаров возрастает прямо пропорционально увеличению объема производства

### Продолжительность отбора воды

Продолжительность обслуживания системой водоснабжения одного пожара (продолжительность отбора воды из системы водоснабжения на противопожарные цели) является важнейшей величиной системы массового обслуживания. Продолжительность обслуживания пожара системой водоподачи складывается из продолжительности локализации пожара, продолжительности последующей ликвидации пожара и продолжительности восстановления израсходованных при пожаре запасов воды. Исходя из этого, рассчитывают объем неприкосновенного запаса воды в запасных и регулирующих емкостях или устанавливают полезный запас воды в пожарных водоемах. Кроме того, объединенную систему производственно-противопожарного водоснабжения рассчитывают на пропуск противопожарных расходов воды в течение 3 ч наибольшего водопотребления

Обработка статистических данных показала, что фактическая продолжительность тушения пожара — это случайная величина, которая изменяется от 0,5 до 28 ч и более. Распределение случайной величины продолжительности отбора воды из водопровода на противопожарные цели описывается показательным законом распределения

$$P\{\tau \leq \tau_{\text{н}}\} = P(\tau) = 1 - e^{-\tau/\tau_*}, \quad (37)$$

где  $P\{\tau \leq \tau_{\text{н}}\}$  — вероятность того, что все значения переменной величины  $\tau$  меньше детерминированной (фиксированной при любых заданных условиях) величины  $\tau_{\text{н}}$  или равны ей,  $\tau$  — продолжительность отбора воды из водопровода на противопожарные цели,  $\tau_*$  — средняя продолжительность отбора воды из водопроводов на пожарные цели.

Ниже приведена средняя продолжительность (математическое ожидание) отбора воды  $\tau_*$  (ч) из водопровода на противопожарные цели.

Жилые и общественные здания:	
до двух этажей . . . . .	0,73
свыше двух этажей . . . . .	0,82
Промышленные здания:	
категории А и Б по СНиП . . . . .	2,32
» В и Г » . . . . .	1,65
Открытые технологические установки категории А и Б по СНиП . . . . .	
	2,8
Склады промышленных товаров и готовой продукции	
	3,10

Из выражения (37) получена формула для определения расчетной (нормативной) продолжительности отбора воды и в зависимости от размера риска  $\varepsilon$ :

$$\tau = \tau_* \ln(1/\varepsilon).$$

Продолжительность отбора воды из водопроводов для тушения пожаров технологических установок нефтеперерабатывающих заводов приведена ниже:

Размер риска $\varepsilon$ . . . . .	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,13	0,2	0,34
Продолжительность отбора, ч . . . . .	12,9	10,8	9,7	8,4	7,5	6,7	5,6	4,5	3

Таким образом, нормативной продолжительности гашения пожаров соответствует недопустимо большой размер риска — 0,34.

Рассматривая действующие нормы продолжительности восстановления израсходованного противопожарного запаса воды, можно отметить, что формулировка требуемой продолжительности восстановления неприкосновенного противопожарного запаса воды  $\tau_b$  неудачна. Очевидно, что  $\tau_b$  должна быть меньше или равна промежутку времени между окончанием одного и началом следующего пожара в сутки с наибольшим числом пожаров  $\tau_b \leq 24/v_* - \tau$  [где  $v_*$  — число пожаров в сутки;  $\tau$  — расчетная продолжительность отбора воды из водопровода, определяемая по формуле (37)].

### Одновременное число отборов воды

Поток требований является простейшим, т. е. требования всегда приходят по одному, независимо друг от друга, и не отмечается двух и более вызовов однове-

менно Вероятностный подход к решению задачи об од-  
новременно возникающих пожарах при простейшем по-  
токе позволил определить число одновременных пожа-  
ров  $\chi$ . Вероятность возникновения одновременно  $\chi$  по-  
жаров  $P_\chi$  в любой момент вычисляют с помощью  
закона Пуассона

$$P_\chi = \frac{(\lambda\tau)^\chi}{\chi!} e^{-\lambda\tau},$$

где  $\lambda$  — параметр Пуассона, равный средней частоте возникновения пожа-  
ров, ч<sup>-1</sup>,  $\tau$  — средняя продолжительность пожара, ч,  $\chi$  — число одновременно  
возникающих пожаров, равное 0, 1; 2; .. л.

В частном случае, когда вероятность того, что в лю-  
бой момент времени потребуется включить водопровод  
лишь для тушения одного пожара ( $\chi=1$ ), будет

$$P\{1\} = \lambda\tau e^{-\lambda\tau}.$$

Рассматривая явления в ограниченные промежутки  
времени, сопоставимые с продолжительностью тушения  
пожара, можно предположить (при достаточно удовле-  
творительном приближении) стационарность потока тре-  
бований и с помощью закона Пуассона вычислить мак-  
симально возможное число пожаров (требований) за  
любое число смежных часов. Распределение одновремен-  
но возникших пожаров в населенных местах при сред-  
ней продолжительности отбора воды, равной 0,78 ч, по-  
казывает, что в городе с численностью населения  
1000 тыс. чел водопровод ежегодно обслуживает 331 по-  
жар, из них в 278 случаях —

один пожар, в 25 случаях —  
одновременно 2 пожара и в  
одном случае — одновре-  
менно 3 пожара. Получен-  
ное таким образом число  
одновременных пожаров в  
населенных местах подро-  
бно и полно отражают про-  
цесс водообеспечения пожа-  
ров, что является надеж-  
ным прогнозом для городов  
будущего.

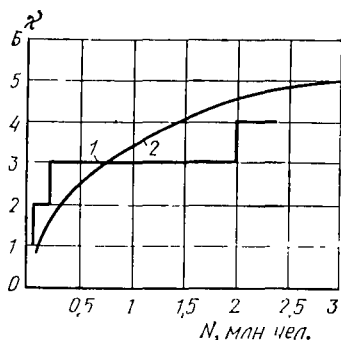


Рис. 52. Зависимость числа  
одновременных отборов воды  
для тушения пожаров от чис-  
ленности населения  
1 — требования норм; 2 — расчетная  
кривая

Зависимость числа одно-  
временных отборов воды для  
тушения пожаров от чис-  
ленности населения пред-  
ставлена на рис. 52.

## Расход воды для тушения одновременно возникших пожаров

Суммарная производительность пожарных насосов должна обеспечивать бесперебойную подачу заданного объема воды. В соответствии с требованиями СНиП эту производительность определяют суммированием наибольшего расхода воды всеми потребителями, вычисленного по детерминированным графикам водопотребления. Следует отметить, что потребители не всегда забирают максимальный объем воды в один и тот же час, а максимальные значения потребления воды в один и тот же час совпадают тем реже, чем больше отборов воды. С увеличением числа одновременных отборов воды для тушения пожаров суммарный расход воды приближается к среднему. Именно поэтому производительность системы, определяемая суммированием максимального расхода воды для тушения одновременно возникших пожаров, будет превышать требуемую для выполнения задачи водообеспечения.

Расход воды, необходимой для обеспечения одновременно возникших пожаров, более точно определяют на основе методов теории массового обслуживания. При решении задачи принято, что система массового обслуживания (система водоснабжения) подает воду для тушения одновременно возникших пожаров. Входящий поток требований — это водопотребление  $q$ , необходимое для успешной ликвидации возникших пожаров. Интенсивность его  $\lambda = \sum q_j$ ; (где  $j = 1, 2, \dots, m$  — число одновременно возникших пожаров). Водопотребление  $q$ , как уже отмечалось, является величиной случайной и наибольшее его значение (при  $0,9 \geq P \geq 0,99$ ) является весьма редким событием. Продолжительность отбора воды величина также случайная, максимальное значение которой не всегда совпадает с максимальным расходом воды. Поэтому максимальные значения потребления воды просуммированы с учетом последовательности и комбинаций одновременных отборов и вероятности появления той или иной величины расхода воды для тушения одновременно возникших пожаров. Суммарный расход одновременно действующих отборов в связи с этим представляет собой только часть величины расхода, полученной непосредственным сложением максимальных расходов воды.

При расчете вместимости резервуаров, производитель-



ности насосов, пропускной способности водоводов и других параметров водопроводных сооружений расход выражается в зависимости от интенсивности потока требований для обеспечения водой всех одновременно возникших пожаров:

$$\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^m \bar{q}_m \quad (i = 1, 2, \dots, m),$$

где  $q$  — математическое ожидание противопожарного расхода воды,  $m$  — число одновременно возникших пожаров

Расчетный расход находят из формулы для определения параметра обслуживания требований

$$\alpha = \lambda/\mu = \sum_{i=1}^m \bar{q}_m/q,$$

где  $\mu = q/m$  — интенсивность обслуживания системой водоснабжения требований подачи воды для тушения одновременно возникших пожаров,  $q$  — расчетный расход воды для обеспечения одновременно возникших пожаров

Исходя из требуемой вероятности бесперебойной подачи воды, подбором значения  $\alpha$  определяют каждый из  $m$  расходов, а затем, суммируя их, находят величину расчетного расхода воды. Вероятность бесперебойной подачи воды (надежность водообеспечения) в этом случае рассчитывают по формуле

$$P = 1 - P(m, \alpha)/R(m, \alpha) = 1 - [\bar{R}(m-1, \alpha)]/[1 - \bar{R}(m, \alpha)],$$

где  $P(m, \alpha) = \frac{\alpha^m}{m!} e^{-\alpha}$  определяется по справочным таблицам  $R(m, \alpha) =$

$$= \sum_{k=0}^{k=m} \frac{\alpha^k}{k!} e^{-\alpha} \text{ распределение Пуассона.}$$

На основании данных  $R(m, \alpha)$ , приведенных в справочной литературе, построены зависимости вероятности бесперебойной подачи воды от параметра обслуживания требований для  $0,85 \leq P \leq 1$  и  $m = 2-5$  (рис. 53).

Ниже приведено распределение расхода воды (л/с) для тушения пяти одновременно возникших в городе пожаров (при  $P = 0,85$ ), полученное на основе изложенного выше метода<sup>1</sup>:

$m$ . . . . .	5	4	3	2	1
$\sum \bar{q}_m$ . . . . .	93,5	74,8	56,1	37,4	18,7
$\alpha$ . . . . .	3,5	2,4	1,6	0,8	0,28
$q$ . . . . .	26,6	31,2	35	46,8	66,8
$q/\bar{q}$ . . . . .	1,42	1,67	1,87	2,5	3,57

<sup>1</sup> Математическое ожидание расхода воды для тушения каждого из пожаров принято равным 18,7 л/с.

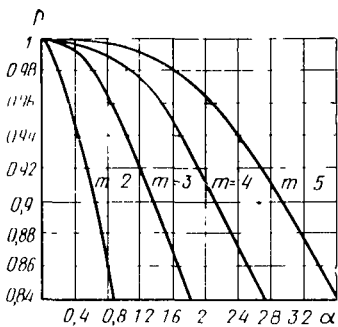
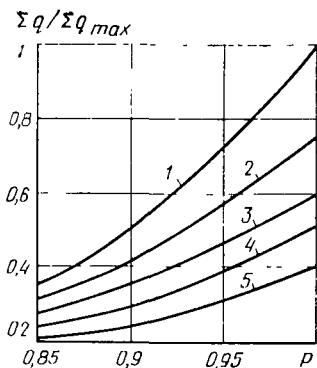


Рис 53 Зависимость вероятности бесперебойной подачи воды от параметра обслуживания требований водообеспечения при числе одновременных отборов воды

Рис. 54. Зависимость величины расхода воды от числа одновременных отборов для тушения пожаров

1 —  $m=1$ ; 2 —  $m=2$ ; 3 —  $m=4$ ; 4 —  $m=6$ ; 5 —  $m=10$



Суммарный расход воды для тушения пяти одновременно возникших в городе пожаров  $\Sigma q = 206,4$  л/с. Приведенные данные свидетельствуют о существенном отличии предлагаемого метода расчета от общепринятых. Данные о частоте пожаров, характере их распределения, продолжительности и величине отбора воды при тушении пожара позволяют сформулировать требования к бесперебойной подаче воды для тушения пожаров и установить зависимость величины расхода воды от числа одновременных отборов (рис. 54)

### Качество бесперебойного водообеспечения

Важной задачей системы противопожарного водоснабжения является бесперебойное обеспечение водой потребителей. Вводя понятия «эффективность» и «качество работы» применительно к системам водоснабжения, изложим принципы подхода к созданию критериев их оценки. Эффективность водоснабжения оценивается с учетом свойств системы, схемы соединения элементов и качества работы комплекса водопроводных сооружений на основе вероятностных характеристик их состояний. Случайные величины, охарактеризованные интегральной функцией распределения вероятностей  $P(x)$ , ис-

пользовались для оценки качества работы системы и из условия, что случайная величина  $\chi$  не превышает некоторого заданного значения  $\chi_n$ , т. е.  $F(\chi_n) = P(\chi \leq \chi_n)$ .

В качестве комплексного показателя противопожарного водообеспечения, учитывающего и бесперебойность и качество водоснабжения, принято математическое ожидание требуемого количества воды, подаваемой системой в соответствии с требованиями водообеспечения. Этот показатель обусловлен характеристикой вероятности обеспечения требуемого количества воды:

$$P_0 = \sum_{j=0}^m P[q_j] P[q_j \geq q] \quad (j = 0, 1, 2, \dots, m), \quad (38)$$

где  $P[q_j]$  — вероятность нахождения системы в состоянии  $j$ , характеризующемся возможной водоотдачей  $q_j$ ;  $P[q_j > q]$  — характеристика качества функционирования  $j$ -того состояния (вероятность того, что возможная водоотдача  $q_j$  будет выше, чем требуемое для тушения пожара количество воды),  $j = 0, 1, 2, \dots, m$  — возможные состояния системы.

Вероятность качества водообеспечения, характеризующая подачу требуемого количества под требуемым напором, выражается как

$$P[q_{\min} \leq q \leq q_{\max}] \leq 1 - \varepsilon, \quad (39)$$

где  $q$  — рассматриваемый расход воды, подаваемой под требуемым напором,  $\varepsilon$  — допустимый размер риска.

На основе выражений (38) и (39) составлено уравнение комплексного показателя качества бесперебойного водообеспечения

$$P = \sum_{j=0}^n P[q_j] \prod_{k=1}^m P[(q_{k\min} \leq q_k \leq q_{k\max})_j | (q_j \geq q)],$$

где  $m$  — число рассматриваемых показателей качества подаваемой или противопожарные нужды воды (расход, напор, содержание химических добавок и др.).

Тогда вероятность бесперебойного водообеспечения будет

$$P_{в,0}(=q_0/q) = \sum_{j=0}^n \alpha_j P[q_j],$$

где  $q_0$  — водоотдача системы в исправном состоянии,  $q$  — математическое ожидание требуемого количества воды,  $\alpha_j = q_j/q_0$  — уровень качества водообеспечения в состоянии  $j$ .

Для определения показателей качества бесперебойного водообеспечения можно использовать аналитические методы определения характеристики полезного эф-

фекта в зависимости от затрат. Основу этих методов составляют выражения:

$$\left. \begin{aligned} \Pi &= E_{\Pi} K + \Theta + Y - \min, \\ q &= F \{ E_{\Pi} K + \Theta + Y \} = f(\varepsilon). \end{aligned} \right\}$$

Решение задачи в этом случае сводится к выражению членов, входящих в правую часть, в виде функциональной зависимости от величины  $q$  или  $\varepsilon$ . Следующим этапом расчета является раскрытие функциональной связи слагаемых уравнения с показателем  $\varepsilon$ , отвечающим минимуму приведенных затрат  $\Pi$ . Следует отметить, что зависимость размера ущербов  $Y$  от показателя в полном виде раскрыть не удалось из-за сложности учета его компонентов и отсутствия достаточно корректных методов оценки  $Y$ . В то же время стандарт СЭВ<sup>1</sup> предусматривает три степени размера ущерба от отказов той или иной технической системы в процессе ее эксплуатации.

Первая степень ущерба характеризуется угрозой безопасности людей, значительным материальным с большими косвенными потерями, превышающими стоимость объекта, или моральным ущербом, что требует принятия таких мер, которые практически исключали условия, приводящие к невыполнению поставленных перед системой задач.

Вторая степень ущерба характеризует материальный ущерб от невыполнения задачи или простоя, размер которого одного порядка со стоимостью объекта.

Третья степень ущерба характерна для объектов, материальный ущерб от отказа работы технических систем которых приводит к утрате части объекта, подлежащего восстановлению.

## 12 НАДЕЖНОСТЬ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Надежная работа многофункциональных систем водоснабжения является важным условием бесперебойного водообеспечения пожарной техники и снижения ущербов от пожаров.

Многофункциональная система водоснабжения с точки зрения выбора номенклатуры показателей и оценки надежности является сложной технической системой.

<sup>1</sup> Стандарт СЭВ 878—78. Надежность в технике. Порядок выбора номенклатуры нормируемых показателей.

Эта система представляет собой совокупность взаимосвязанных элементов, обеспечивающих выполнение заданных функций несколькими различными способами, отличающимися уровнями качества функционирования системы. Такими элементами в многофункциональной системе водоснабжения являются: водооточник; станция водоочистки, насосные, подающие воду в водопроводную сеть, резервуары для хранения и регулирования подачи воды; водоводы и водопроводная сеть. Возможно и дальнейшее членение системы на детали, узлы, агрегаты, приборы и т. п. Однако приведенные деления системы на элементы в зависимости от способа выполнения заданной задачи в полной мере определяют состав элементов, одновременно выполняющих поставленную цель.

В результате отказов элементов системы ухудшается характеристика качества функционирования<sup>1</sup> и соответственно снижается выходной эффект<sup>2</sup> системы, поэтому задачи надежности сводятся к выявлению влияющих отказов элементов на качество функционирования и выходной эффект системы водоснабжения.

## Показатели оценки надежности

Надежность водоснабжения характеризуется безотказностью — сохранением непрерывного состояния работоспособности в определенных условиях водообеспечения потребителей, ремонтнопригодностью — приспособленностью системы водоснабжения к предупреждению, обнаружению и устранению неисправностей и отказов; долговечностью — продолжительностью сохранения состояния работоспособности с возможными перерывами на ремонт.

Рассчитать надежность противопожарного водоснабжения — это значит определить количественные показатели, характеризующие уровень качества бесперебойного водоснабжения потребителя системой. Для оценки надежности используют следующие показатели: вероятность безотказной работы (безотказного водоснабжения) за время  $\tau$  —  $R_{\tau}$ , интенсивность отказов  $\lambda$ , интенсивность

---

<sup>1</sup> Количественная оценка качества функционирования в определенном ее состоянии при выполнении данной задачи

<sup>2</sup> Полезный результат, полученный при эксплуатации в данный интервал времени.

восстановления  $\mu$  (показатель не учтен ГОСТом), наработку на отказ  $T$  (средняя продолжительность безотказного водоснабжения), среднюю продолжительность восстановления  $\tau_b$ , параметр потока отказов  $\omega$ , а также коэффициенты готовности  $K_1$ , простоя  $K_{II}$  (показатель не учтен ГОСТом), технического использования  $K_{III}$ , неисправности  $p = \lambda/\mu$  (показатель не учтен ГОСТом) и некоторые другие. Таким образом, показатели надежности различны: одни из них характеризуют состояние системы в определенный момент времени (вероятности безотказной работы), другие — в интервале времени (среднее число отказов за ресурс), одни — размерные (наработка на отказ), другие — безразмерные (коэффициент готовности).

Задачи надежности в зависимости от поставленных целей бывают двух типов. Первый тип задач — определение количественных характеристик надежности на основе технических показателей элементов систем и функциональных связей между ними, а также требований потребителей к качеству бесперебойного водообеспечения. Задачи этого типа ставят при оценке надежности на различных этапах проектирования, при сравнительной оценке вариантов систем или проверке обеспечения требуемого уровня надежности.

Второй тип задач представляет собой анализ надежности, который проводят для установления количественных показателей, оценивающих влияние отдельных факторов на комплексный показатель надежности системы. Исходные данные для расчета включают помимо данных, используемых в решении задач первого типа данные о приоритете водообеспечения отдельных объектов и показатели ущерба из-за ненадежности системы. В результате решения этой задачи возможна проверка обеспечения требуемого уровня надежности или обоснование его экономической целесообразности, а также выявление возможности оптимизации системы с учетом ее развития или изменения уровня бесперебойного водообеспечения.

Надежность системы определяют не только показатели надежности входящих в нее элементов и схем их соединения, но и наличие резерва функционирования. Важным вопросом при решении задач надежности является правильность деления системы на элементы с точки зрения соответствия тем функциям, которые они должны выполнять. Надежность системы водоснабжения

определяется надежностью входящих в нее элементов, схемой их соединения, наличием резервных элементов, качеством строительства и эксплуатации системы. Применение высококачественных материалов и оборудования, качественное строительство и соответствие характеристик построенных сооружений характеристикам проектной документации обеспечивают надежность на стадии строительства.

В процессе эксплуатации надежность достигается своевременным текущим контролем за работой системы, правильным уходом за оборудованием, своевременным обнаружением, ликвидацией неисправностей и т. д. Для этого используют оптимальные методы технического обслуживания и ремонта, разработанные на основе анализа и обработки данных о надежности изделий по результатам эксплуатации. В процессе эксплуатации выявляют также ошибки и просчеты, допущенные во время проектирования и реализации проекта.

При проектировании систем необходимо проверять показатели надежности, для определения которых важно сформулировать требования, выбрать параметры и установить нормы заданного уровня качества бесперебойного водообеспечения. Работоспособность — состояние системы, при котором она способна обеспечивать заданный уровень качества бесперебойного водоснабжения потребителей, установленный требованиями или критическими условиями водообеспечения расчетных моделей.

Требования СНиП не устанавливают показателей надежности и не используют понятия и характеристики (выходные параметры) систем, дающие возможность перейти на показатели надежности. В то же время косвенными характеристиками для определения показателей надежного водообеспечения потребителей служат: нормы водообеспечения, суммарная производительность водопитателя, требования к бесперебойности подачи воды по водоводам и водопроводным сетям, требования к дублированию источников энергоснабжения насосных агрегатов, резервирование элементов сооружений, срок службы системы и т. п.

Говоря о «надежности противопожарного водообеспечения», имеют в виду не какую-то абстрактную надежность, а надежность водоснабжения потребителей во время пожара. В результате можно дать следующее определение надежности системы водоснабже-

Н и я, представляющей собой комплекс водопроводных сооружений — это способность (вероятность) обеспечения бесперебойной подачи требуемого количества воды потребителю (близкого к оптимальному) с заданным напором в течение заданного срока службы. Надежность следует понимать в двух аспектах: качественном — свойство системы, включающей сооружения и потребителей (характер водообеспечения), и количественном — мера суждения об определенном состоянии системы водоснабжения (характеристика этой меры — показатель надежности).

Под «заданными функциями» в общем случае понимают регламентированные требования потребителей к бесперебойности водообеспечения. Когда эти функции выполняются системой по отношению к конкретному потребителю  $i$ , считается, что система находится в работоспособном состоянии (состоянии работы) по отношению к  $i$ . Следует отметить, что службы эксплуатации не осуществляют строгого контроля за соблюдением норм отбора воды для тушения пожаров, на которые рассчитана система. В результате чрезмерного отбора воды на противопожарные нужды отмечаются нарушения водоснабжения других потребителей или разрушение водопроводных труб из-за недопустимого повышения давления при гидравлических ударах, возникающих в результате повышенной водоотдачи водопроводной сети во время работы пожарных автонасосов. Таким образом, система в одном и том же состоянии может быть работоспособной по отношению к потребителю  $i$  и неработоспособной по отношению к потребителю  $j$  (состояние отказа по отношению к потребителю  $j$ ). Недостаточная надежность системы в этом случае приводит к ухудшению или нарушению нормального хозяйственно-питьевого водообеспечения, необходимого для естественного потребления воды и создания комфортных условий для населения. При рассмотрении вопросов надежности важным является понятие «состояние отказа», определяющего уровень качества бесперебойного водообеспечения и выход его за допустимый предел.

### **Отказы системы**

**Состояние отказа характеризует частичную или полную утрату качества функционирования. Система водоснабжения может находиться в состоянии полного**



или частичного отказа<sup>1</sup>. Отказ — событие, при котором технологические показатели работы системы водоснабжения выходят за пределы сформулированного понятия работоспособности. К отказам относятся недопустимые отклонения параметров от требуемых значений водообеспечения, временные нарушения водообеспечения системой или выход системы из строя с полным прекращением подачи воды. Требуемое водообеспечение в данном случае представляет собой значение, минимизирующее приведенные капиталовложения, издержки эксплуатации и затраты на возмещение последствий от пожаров, вызванных нарушением бесперебойного водообеспечения за нормативный (заданный) срок службы системы. Видимо, оптимальному значению водообеспечения отвечает определенная вероятность или допустимый риск. Состояние отказа для систем водоснабжения может быть сформулировано как: любой кратковременный перерыв в подаче воды для тушения пожара; нарушение режима водообеспечения, заданного нормами расхода и напора воды, подаваемой для противопожарных нужд; перерыв в водоснабжении хотя бы одного потребителя; перерыв в водоснабжении части потребителей; полное прекращение водоснабжения потребителей; перерыв в водоснабжении на время, превышающее регламентированное для данной группы потребителей, и др.

В коммунальных системах водоснабжения отказы некоторых элементов не приводят к потере работоспособности системы в целом, но иногда являются запасем «запланированным» событием (профилактический плановый ремонт участков водопроводной сети; замена насосно-силового оборудования после установленного срока службы и т. п.).

Таким образом, за меру надежности системы принимается вероятность случайного события, в результате которого за установленный срок эксплуатации не произойдет ни одного отказа. Отказы, вызывающие нарушение заданного режима водообеспечения при тушении пожаров (например, отказ пожарного гидранта, разрушение участка водопроводной сети и др.), могут произойти не только в результате аварий и повреждений отдель-

---

<sup>1</sup> Полный отказ — отказ, в результате которого система становится неспособной выполнять заданные функции. Частичный отказ — отказ элементов системы, после которого система еще способна выполнять заданные функции.

ных элементов самой системы («внутренние» отказы водоснабжения — рис. 55, а), но и в результате воздействия внешних факторов («внешние» отказы водоснабжения — рис. 55, б).

За отказ системы водоснабжения на стадии ее расчета и проектирования понимается состояние, которое не может отвечать заданным требованиям, формализуемым с помощью критических условий водообеспечения на основе расчетных моделей. Вероятность отказа в этом случае является вероятностью выхода (выброса) за некоторый допустимый уровень. В системе водоснабжения, работающей в режиме пожаротушения, появление независимого события (отказа) характеризует вероятность того, что фактические параметры водопотребления превышают расчетные, определяемые требованиями нормативов. К этим параметрам относятся: расход воды для тушения пожара, продолжительность отбора в процессе тушения, продолжительность восстановления израсходованного при пожаре неприкосновенного запаса воды, одновременное число отборов при пожаре, график неравномерности водоотбора потребителей.

При рассмотрении сложного вероятностного процесса отбора воды для тушения пожаров важно установить оптимальную норму водообеспечения потребителя или отвечающий ей размер риска  $\epsilon$ . Значение  $\epsilon$  изменяется в пределах доверительного интервала, тем большего, чем менее точен прогноз капитальных затрат, издержек эксплуатации и возмещения ущерба от пожаров. Кроме того, значение  $\epsilon$  меняется со временем. Состояние, характеризующее нарушение расчетного водообеспечения конкретного потребителя, может быть представлено следующим образом. Пусть система водоснабжения обеспечивает потребителей водой в соответствии с заданными графиками режима потребления воды по часам суток, дням недели и сезонам года и находится в  $N$  различных состояниях. Множество состояний  $N$  разобьем на два подмножества. Подмножество  $N_{R_i}$  — совокупность состояний, в которых потребитель  $i$  имеет связь хотя бы с одним источником системы (система связана в данном состоянии), а подмножество  $N_{Q_i}$  — совокупность состояний, в которой таких связей нет (система не связана). Состоянию системы в точке  $i$  соответствует определенная водоотдача  $\Phi(q_{ij})$ , характеризующая в данной точке качество бесперебойного водообеспечения,

а)

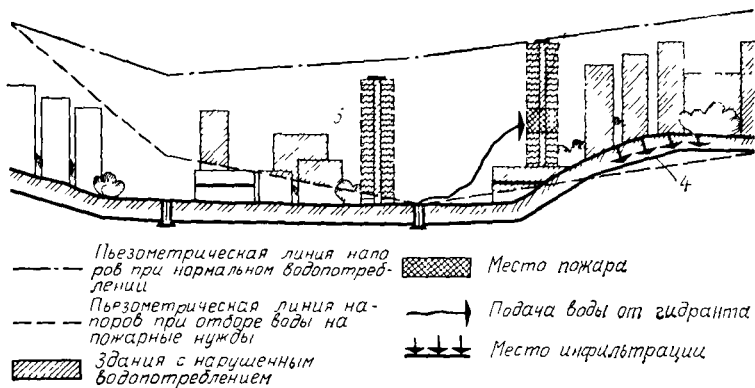


Рис. 55 Схема отказов водопроводной сети

а — «внутренний» отказ; б — «внешний» отказ, 1 — нарушение подачи воды при выходе из строя пожарного гидранта, 2 — нарушение водоснабжения при аварии участка сети, 3 — нарушение водообеспечения жителей города из-за снижения напора при чрезмерном отборе воды для тушения пожаров, 4 — нарушение санитарно-гигиенических условий водоснабжения (образование инфильтрации, вызванной разрежением в сети) в результате отбора воды при тушении пожаров

которое зависит от пропускной способности элементов системы, характера изменения напора воды в водопроводной сети и подачи водоисточника в данном состоянии. В некоторых случаях на качество бесперебойного водообеспечения значительно влияет процесс водопотребления более ответственными потребителями системы, чем потребитель  $i$ .

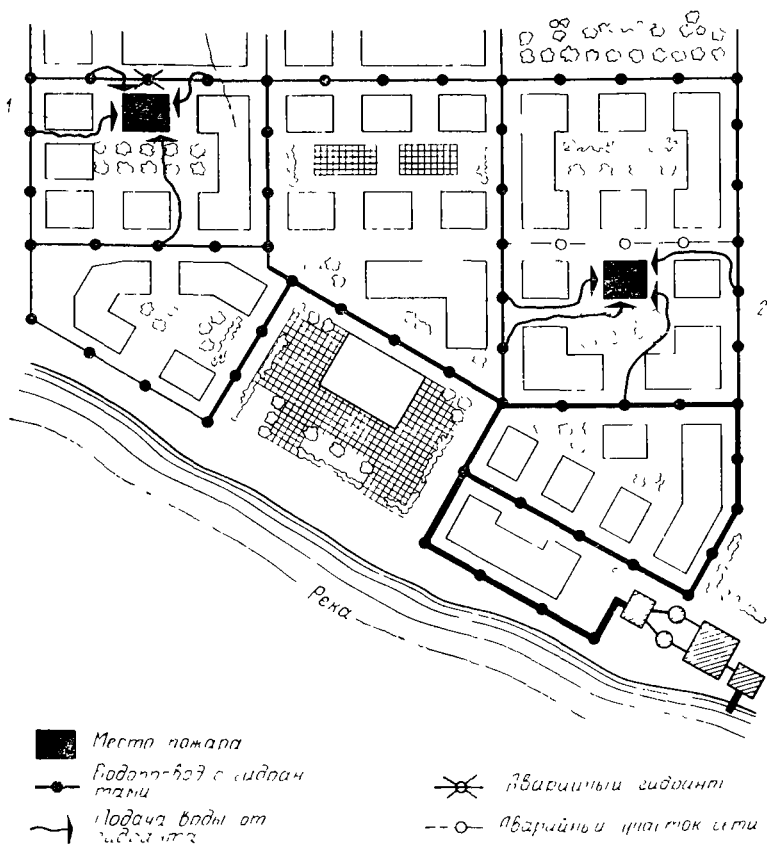
В общем случае характеристика качества бесперебойного водообеспечения имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \Phi(q_{ij}) &= 0 \quad \text{для } j \in N_{Q_i}; i \\
 \Phi(q_j) &\leq q_i(\tau) \quad \text{для } j \in N_{R_i},
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

где  $q_i(\tau)$  — водопотребление в точке  $i$  в момент  $\tau$ .

Для всех водопотребителей в начальном состоянии  $j=0$  характеристика качества водообеспечения  $\Phi(q_{i0}) \geq q_i(\tau)$ . Если не учитывать колебания водопотребления  $q_i(\tau) = q_i = \text{const}$  (первое допущение), то состояние  $k$  с  $\Phi(q_{ik}) < q_i$  считается состоянием нарушения нормального водопотребления в точке  $i$  (второе допущение). Первое допущение снимается при наличии заранее установленных графиков водопотребления в течение суток, недели и сезона. Использование графика колебания водопотребления по продолжительности дает возможность

6)



рассматривать режим водопотребления как стационарный процесс. Это допущение лишь несколько уменьшает точность значений характеристики качества бесперебойного водообеспечения, так как расчетная модель не учитывает параметры режима минимального водопотребления. Поэтому для данного случая справедливо выражение (40). Для остальных состояний  $0 \leq \Phi(q_{ij}) \leq \Phi(q_{i0})$  характеристика водообеспечения показывает, что последствия отказов элементов различны. Отказы одних элементов могут даже не изменить водоотдачи потребителю  $i$ , в то время как отказы других элементов могут полностью прекратить подачу воды. Образуя для каждого потребителя системы ранжированный ряд состояний из условий, что водоотдача системы в каждом по-

следующем состоянии не будет больше предыдущей, т. е.  $\Phi(q_{im}) \geq \Phi(q_{i(m+1)})$  ( $m$  — состояния системы относительно потребителя  $i$ ), получим, что состояние отказа  $k$  для потребителя  $i$  будет  $\Phi(q_{ik}) < q_i$ , а переход системы в состояние  $l$  будет  $\Phi(q_{il}) \geq q_i$ , т. е. процесс восстановления отказа произойдет за время  $\tau > \tau_{\text{пер.л.}}$ . Второе допущение не является сильным, так как можно вычислить время нахождения системы в состоянии  $k$ , если она первоначально находилась в любом известном состоянии  $j$ . Для потребителей первой и второй категорий надежности подачи воды системами водоснабжения в соответствии с требованиями СНиП погрешность подобного допущения мала, так как мало время нахождения системы в состояниях  $\{k\}$  для этих потребителей. Влияние погрешности ощущается при расчете надежности водоснабжения потребителей, допускающих длительный перерыв водоснабжения. Сопоставляя  $N_{R_i}$  и  $N_{Q_i}$  с  $N'_{R_i}$  и  $N'_{Q_i}$ , получим одно из следующих состояний  $N_{R_i} = N'_{R_i}$  и  $N_{Q_i} = N'_{Q_i}$  или  $N_{R_i} > N'_{R_i}$  и  $N_{Q_i} < N'_{Q_i}$ , причем  $N_{R_i} - N'_{R_i} = N'_{Q_i} - N_{Q_i} = N'_{Q_i}$ . Это позволяет разграничивать состояние работы и состояние отказа. Если невозможно установить четкую границу между состояниями, то рабочее состояние  $\{j\}$  для потребителя  $i$  характеризуется выражением  $\Phi(q_{ij}) > q_i$ , а состояние отказа  $\{l\}$  для потребителя  $i$  —  $\Phi(q_{il}) \ll q_i$ . Вместе с этим возможны состояния спада водообеспечения  $\{k\}$  (система в этих состояниях работает с пониженной водоотдачей, что снижает уровень качества бесперебойного водообеспечения). В системе с  $N$  различными состояниями переход системы из состояния  $i$  в состояние  $j$  определяется вероятностью перехода  $P_{ij}$ , удовлетворяющей следующим условиям:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n P_{ij} &= 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \\ P_{ij} &\geq 0 \quad (i \neq j, \quad j \leq N). \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, в коммунальной системе водоснабжения возникновение отказов даже достаточно большого числа элементов или значительные отклонения эксплуатационных показателей от заданных (например, снижение напора в водопроводной сети, уменьшение запасов

воды в резервуарах, авария на отдельных участках сети и др.) приводят не к полному выходу ее из строя, а лишь к снижению уровня качества бесперебойного водообеспечения.

## Влияние случайных факторов

Система водоснабжения подвержена влиянию случайных факторов, которые необходимо прогнозировать. Для расчета параметров системы необходимо знать возможные источники случайных воздействий, а также их количественные характеристики. Случайные воздействия внешней среды (климата, времени года, метеорологических условий и т. д.), отклонения от нормального режима водопотребления внутри самой системы (включенное непредвиденного количества пожарной техники, обусловленное ростом уровня пожарной опасности объектов; чрезмерное потребление воды на хозяйственно-питьевые нужды в результате улучшения уровня санитарно-технического обеспечения и др.) бывают настолько значительными, что могут привести к существенному изменению параметров работы системы. Поэтому оценке влияния указанных факторов необходимо уделять серьезное внимание при проектировании новых и реконструкции существующих систем. Несмотря на это, влияние случайных факторов далеко не всегда учитывается, и фактические условия работы системы часто существенно отличаются от условий, на которые она была рассчитана при проектировании. Например, режим водопотребления при тушении пожаров зависит от большого числа причин, которые трудно учесть, поэтому расход воды при тушении пожаров выражают случайной величиной. Абсолютная жесткость нормативных характеристик водообеспечения для противопожарных целей, как показано выше, не гарантирует достоверности того, что при увеличении зоны рассеивания фактические расходы воды могут существенно превысить нормативные. Следует также отметить, что потребление воды для тушения пожаров увеличивается из года в год. Наряду с этим модернизируется техника для отбора воды на противопожарные нужды и увеличивается производительность пожарных насосов. В то же время не исключено, что параметры работы системы водоснабжения, определяющие характеристики ее функционирования в течение определенного срока службы, будут ниже характеристик функ-

ционирования новой пожарной техники. Это приведет к спаду функционирования системы водоснабжения. Определение влияния отказов на качество бесперебойного водообеспечения является предметом исследования надежности систем водоснабжения. При разработке критериев и норм надежности водообеспечения и выборе номенклатуры соответствующих параметров необходимо учитывать конструкции водопроводных сооружений системы на стадии проектирования, а также прогнозы развития пожарной техники. Вероятность нормального функционирования системы водоснабжения зависит не только от правильного определения продолжительности отбора воды, но и от расчета продолжительности восстановления израсходованного количества воды при пожаре. Для определения уровня качества работы системы необходимо иметь математическую модель для определения характеристик состояний системы в зависимости от ее параметров.

## Модель функционирования

Процессы надежного водоснабжения удобно рассматривать с помощью математических моделей, которые дают возможность выделить, обособить и проанализировать связи между элементами системы для каждой конкретной задачи. При определении эффективности работы систем пожаротушения использованы модели, описывающие процесс эксплуатации системы, которая представляет сложное инженерное сооружение, состоящее из нескольких функционально самостоятельных подсистем, десятков агрегатов, сотен узлов и элементов. Основоположающим в анализе эффективности и надежности является понятие системы. Сложной системой называется «совокупность взаимосвязанных элементов<sup>1</sup>, обеспечивающих выполнение заданных функций несколькими различными способами и отличающихся уровнями качества функционирования». Отнесение той или иной системы к разряду сложных или простых, как видно из их определения, является условным и зависит от цели и решения задачи. Расчленение системы на элементы является

---

<sup>1</sup> Элемент системы — часть системы, выполняющая определенные функции и не подлежащая дальнейшему расчленению на части при данной степени подробности рассматриваемой системы (детали, узлы, агрегаты, машины, простые системы).

первоочередной задачей при построении расчетной модели для формального описания системы. Для упрощения решения некоторых задач можно уменьшить число связей путем объединения ряда элементов в подсистему.

Показатели надежности определяют сравнением показателей качества функционирования и выходного эффекта, которые отражают степень стабильности работы системы водоснабжения при выполнении возложенных на нее задач противопожарного водообеспечения. Для этого формулируют цель и задачи системы водоснабжения исходя из требований водообеспечения пожарной техники, причем каждая задача, возлагаемая на систему, имеет свой номер, по степени важности ( $i=1, 2, \dots, m$ , где  $m$  — общее число задач). Каждому элементу, входящему в систему водоснабжения, присваивается номер ( $i=1, 2, \dots, n$ , где  $n$  — число элементов) в зависимости от специфики конкретной схемы водоснабжения. Состояние каждого  $i$ -го элемента описывается функцией:

$$X_i(t) \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й элемент работоспособен;} \\ 0, & \text{если } i\text{-й элемент отказал.} \end{cases}$$

Потребность в выполнении  $j$ -й задачи описывается функцией

$$Y_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{если есть потребность в выполнении } j\text{-й задачи,} \\ 0, & \text{если нет потребности в выполнении } j\text{-й задачи.} \end{cases}$$

Состояние системы водоснабжения описывается вектором

$$\bar{z}(t) = \begin{pmatrix} X_1(t) \\ \vdots \\ X_n(t) \\ \vdots \\ Y_1(t) \\ \vdots \\ Y_m(t) \end{pmatrix}$$

Изменение во времени вектора  $\bar{z}(t)$  является математической моделью функционирования системы водоснабжения, которая состоит из  $m$  элементов и выполняет  $n$  поставленных перед ней задач водообеспечения. При построении модели часто используют принцип последовательного обобщения информации исходя из иерархической структуры отдельных частей элементов, последовательно объединяемых в более общее. В качестве частных являются модели определения продолжи-



тельности подачи воды, вместимости водисточника, инерционности системы контроля и автоматики и т. п. Расчеты по таким моделям независимы друг от друга. Поведение и свойства систем рекомендуется оценивать количественными характеристиками, полученными экспериментально. Каждая характеристика дает представление об одном из свойств системы (представляет собой количественную оценку степени пригодности системы к выполнению поставленной перед ней задачи). Комплексный показатель эффективности системы в этом случае определяется соотношением между приведенными затратами на строительство, эксплуатацию и возможные ущербы от пожаров и показателем, характеризующим качество водообеспечения при тушении пожаров. Это позволяет согласовать разнородные цели и стимулировать оптимальное использование ассигнований. Комплексный показатель эффективности, представляющий собой количественную оценку выходного эффекта с учетом эксплуатационных затрат конкретной ситуации, в общем виде выражается функциональной зависимостью

$$W = W(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n; \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n),$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  — параметры, характеризующие полезный результат при эксплуатации системы за данный интервал времени,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  — параметры внешней среды,  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$  — параметры приведенных затрат, учитывающих капитальные вложения, издержки эксплуатации и потери от пожаров

Расчет характеристики качества функционирования системы водоснабжения состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляют параметры, характеризующие общее количество воды для потребителей (сут), на втором — устанавливают параметры, характеризующие распределения ее между потребителями по часам суток, и проверяют, сможет ли система обеспечить потребителей водой в течение установленного срока. Для этого определяют характеристику  $\Phi_z(t) = \Phi[\bar{z}(t)]$  как функцию вектора  $\bar{z}(t)$  в рассматриваемый момент времени  $t$ . Поскольку функция  $\Phi[z(t)]$  изменяется случайным образом во времени (в связи с изменением вектора  $\bar{z}(t)$ ), то показателем качества функционирования можно считать математическое ожидание функции  $\Phi[z(t)]$  в момент времени  $t$ :

$$\Phi(t) = M\Phi[z(t)]$$

Каждой реализации функции  $\Phi[z(t)]$  соответствует выходной эффект  $\varphi[z(a, b)]$ , получающийся при эксплуатации системы в интервале  $a \leq t \leq b$ . Нормы рекомендуют достаточно простой прием, в основу которого

положены требования «подачи полного расчетного расхода на тушение пожара» при «наибольшем часовом расходе воды на другие нужды». Подобный прием при кажущейся очевидности использования вероятностного решения задачи не является достаточно объективным. Этот элементарный этап является в то же время очень важным, поскольку именно здесь решается вопрос о надежности и экономичности системы. Для суждения о надежности важно знать не только поведение проектируемой системы водоснабжения в процессе отбора воды на тушение пожаров, но и учитывать влияние случайных факторов на этот процесс, поэтому на первом этапе расчета необходимо учитывать требования надежности. Для этого строят расчетную модель, имитирующую поведение и взаимодействие элементов сложной системы с учетом случайных возмущающих факторов. Для оценки надежности сложных систем водоснабжения с известными расчетными параметрами используют вероятностные характеристики оценки уровня качества водообеспечения. На основании этих характеристик возможны математическое моделирование ситуаций, имитирующее поведение и взаимодействие элементов сложной системы с учетом случайных возмущающих факторов, и оценка характеристик систем (функционалов) для заданных начальных условий и численных значений параметров системы противопожарного водоснабжения. Построенная таким образом расчетная модель отражает зависимость надежности водообеспечения от различных случайных и независимых событий, учитываемых в ходе проектирования систем противопожарного водоснабжения. В основу расчетной модели может быть положено уравнение для определения вероятности суммы независимых событий, имеющих выход расчетного параметра за пределами допустимого уровня. Оно определяет критические условия, например вероятность независимого события, характеризующего снижение уровня качества функционирования системы ниже заданного предела по отношению ко всем возмущениям, которые могут встречаться при работе систем водоснабжения. В системах водоснабжения при отборе воды передвижной пожарной техникой необходимо рассматривать последовательность различных по уровню работоспособности  $\Phi_i(\tau)$  состояний системы, которая выражается ступенчатой случайной функцией  $f(\tau)$ . Мгновенные показатели надежности определяют в данном случае отношением показателей качества

функционирования, причем возможно использование трех показателей.

Первый показатель надежности вычисляют по формуле

$$R(t) = \Phi(t) / \Phi_0(t).$$

Этот показатель получается усреднением относительно показателя качества функционирования  $R(t)$  в интервале времени  $a \leq t \leq b$  с помощью некоторой «весовой» функции  $\Omega(t)$ . В частности, при  $\Omega(t) \equiv 1$  интегральный показатель качества функционирования (при  $a \leq t \leq b$ ), вычисляемый по формуле

$$\rho[a, b] = \int_a^b R(t) d\Omega(t),$$

имеет размерность времени.

Показателями надежности второго типа являются: альфа-процентный коэффициент готовности  $K(t)$ ; вероятность  $Q_\alpha[a, b]$  альфа-процентного выходного эффекта; среднее время  $T_\alpha[a, b]$  альфа-процентного функционирования; среднее время  $T'_\alpha[a, b]$  до первого спада функционирования ниже заданного уровня.

Показателями надежности третьего типа являются векторные показатели, которые строят как наборы одного из показателей второго типа для различных значений  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l)$ . Например, вектор альфа-процентных коэффициентов готовности определяют по формуле

$$\bar{K}_\alpha(t) = \begin{pmatrix} K_{\alpha_1}(t), \\ \vdots \\ K_{\alpha_l}(t). \end{pmatrix}$$

Показатель надежности многофункциональной системы устанавливают в определенной последовательности. Сначала находят показатели надежности по отношению к выполнению каждой отдельной задачи, затем определяют векторные показатели как наборы однотипных показателей, построенных для каждой задачи отдельно. Усредненный показатель надежности с учетом важности выполняемых задач вычисляют по формуле

$$G = (c_1 G_1 + c_2 G_2 + \dots + c_m G_m) / \sum_{j=1}^m c_j,$$

где  $c_m$  — коэффициент важности выполнения  $m$ -й задачи;  $G_m$  — показатель надежности выполнения  $m$ -й задачи.

## Пути обеспечения надежности

Обеспечение надежности системы водоснабжения, как и других систем массового обслуживания, является одной из основных задач при их проектировании. Система должна быть запроектирована и построена так, чтобы в процессе эксплуатации она выполняла свои функции с заданной степенью бесперебойности. Поскольку функцией систем водоснабжения является подача потребителям воды в соответствии с заданным режимом потребления, то выполнению этих условий отвечает работоспособное состояние системы. Если в результате каких-либо причин снижается качество водообеспечения объекта ниже допустимого предела, то имеет место «отказ» системы. Надежность систем подачи воды достигается структурным резервированием отдельных элементов системы, т. е. параллельным включением нескольких взаимозаменяемых элементов или путем «временного» резервирования.

**Структурное резервирование.** Примером нерезервированной системы подачи воды является водопровод из нескольких  $n$  последовательно включенных элементов (рис. 56, *a*). Его работоспособное состояние обеспечивается только при исправности всех элементов; отказ любого элемента вызывает отказ.

Нерезервированной являются две линии, включенные параллельно между точкой подачи А и точкой отбора Б (см. рис. 56, *b*) при условии, что для бесперебойной подачи воды необходима одновременная работа обеих линий. Предположим, что отказу системы отвечает снижение подачи воды более чем до 70 %. По тракту 1 может быть подано 60 %, по тракту 2 — 40 % (или 50 %) требуемого расхода воды. Подобная система не является резервированной, так как авария любого тракта приводит к снижению подачи более допустимого предела. Вероятность безотказной работы нерезервированной системы определяют по формуле

$$F_1 = \prod_{l=1}^n f_l$$

или при однотипных элементах

$$F_1 = f^n.$$

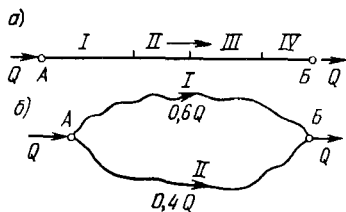


Рис 56 Схема водовода  
 а — последовательное включение элементов, б — параллельное включение элементов

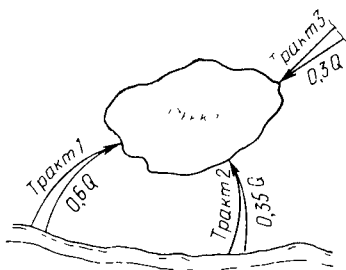


Рис. 57. Схема подачи воды по трем трактам

### Вероятность отказа нерезервированной системы

$$D_1 = 1 - \prod_{i=1}^n f_i$$

или при однотипных элементах

$$D_1 = 1 - f^n.$$

Следовательно, надежность такой системы уменьшается с увеличением числа элементов и всегда меньше надежности каждого ее элемента.

Резервированные системы представляют собой  $m$  элементов, из которых только  $n$  элементов предназначены для обеспечения нормального функционирования системы. Надежность этой системы возрастает с увеличением «кратности резервирования»  $k = m/n$ , где  $m$  — число резервных элементов;  $n$  — число основных элементов. Чем меньше заданное значение  $Q_a/Q$ , тем с меньшей затратой средств достигается требуемая надежность. Примером резервированных систем являются системы транспортирования воды по двум или нескольким параллельно уложенным линиям. Рассмотрим методы оценки надежности на примере системы из нескольких трактов подачи воды, показанных на схеме рис. 57.

Подача по каждому тракту:  $0,6Q$ ,  $0,35Q$  и  $0,3Q$ , где  $Q$  — расчетный расход воды. При исправности всех трактов подается  $1,25Q$ . Отказ системы (снижение подачи ниже  $0,7$ ) наступает при прекращении работы тракта 1 или одновременном отказе трактов 2 и 3.

Обозначим через  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  вероятность безотказной работы отдельных трактов и через  $F_1$  — подобные же

показатели надежности различных комбинаций работы трактов, получим выражение для определения вероятности состояния для одновременной работы всех трактов

$$F_1 = f_1 f_2 f_3.$$

Вероятность состояния, когда работают тракты 1 и 2, а тракт 3 отказал, определяют по формуле

$$F_{II} = f_1 f_2 (1 - f_3).$$

Вероятность состояния, когда одновременно работают тракты 1 и 3, а тракт 2 отказал, устанавливают по формуле

$$F_{III} = f_1 f_3 (1 - f_2).$$

Отсюда вероятность безотказной работы системы вычисляют по формуле

$$F = F_1 + F_{II} + F_{III} = f_1 f_2 f_3 + f_1 f_2 - f_1 f_2 f_3 + f_1 f_3 - f_1 f_2 f_3 = f_1 f_2 + f_1 f_3 - f_1 f_2 f_3.$$

Подставляя в формулу численные значения  $f_2 = f_3 = 0,8$ , получим вероятность безотказной работы системы  $F_I = 0,56$ .

Надежность системы (например, при устройстве водоводов, подающих воду от насосной станции в водопроводную сеть), состоящей из  $n$  параллельно включенных одинаковых элементов с одинаковой вероятностью безотказной работы  $f$ , определяют по формуле

$$F_{\text{сист}} = 1 - (1 - f)^n.$$

При $n=1$	.....	$F_1 = f,$
$n=2$	.....	$F_2 = 2f - f^2,$
$n=3$	.....	$F_3 = 3f - 3f^2 + f^3.$

Предположим, что  $f = 0,6$ , тогда  $F_1 = 0,6$ ;  $F_2 = 0,84$  и  $F_3 = 0,94$ , т. е. надежность системы возрастает с увеличением числа линий. Еще больший эффект увеличения надежности водоводов достигают при устройстве соединительных перемычек.

Кольцевая водопроводная сеть является резервированной системой. Большинство точек отбора воды соединено с точками питания сети многими возможными путями, поэтому аварии отдельных участков сети не нарушают существенно процесса водообеспечения.

Следует отметить, что увеличение роста водопотребления населенных пунктов по сравнению с прогнозом водообеспечения вызывает необходимость развития сис-

темы водоснабжения путем реконструкции и модернизации водопроводных сооружений за счет увеличения числа водоводов, прокладки дополнительных магистралей сети, замены агрегатов на насосных станциях и установок на очистных сооружениях более мощными, а иногда строительства более совершенных источников и водозаборов.

**Временное резервирование.** Вторым способом увеличения надежности является использование резервных и аккумулирующих емкостей для хранения запасов воды в период ремонта отказавших элементов. Наиболее распространенным методом временного резервирования является устройство запасного резервуара в конечной точке водовода. Вместимость резервуара в этом случае должна быть достаточной для снабжения объекта на время ликвидации аварии водовода. В ряде случаев при резервуаре устраивают для этой цели насосную станцию.

### **13. РАБОТА ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПРИ НЕФИКСИРОВАННОМ ОТБОРЕ ВОДЫ**

При расчете наружных водопроводных сетей систем противопожарного водоснабжения принимают упрощенную схему отбора воды исходя из допущения, что через пожарный гидрант отбирается фиксированный<sup>1</sup> расход воды, равный по величине нормативному. В действительности в работающей водопроводной сети все изменения в отборе воды влияют на свободные напоры в участках сети, а следовательно, и на потенциальную отдачу воды. Именно поэтому отбор воды из сети на тушение пожаров, принимаемый в расчетах за фиксированную величину, в действительности не является фиксированным, так как зависит от условий совместной работы водопитателей, водопроводной сети и системы отбора воды на противопожарные нужды.

Отбор воды зависит также от условий ее подачи к водоразборному устройству. Водоотдача (при равновеликих напорах и диаметрах сети) будет наибольшей из кольцевой сети, в которой от двух до четырех направлений притока воды и наименьшей — из тупиковой сети

---

<sup>1</sup> Расход воды, не зависящий от гидравлических характеристик водопроводной сети и системы отбора воды на противопожарные нужды.

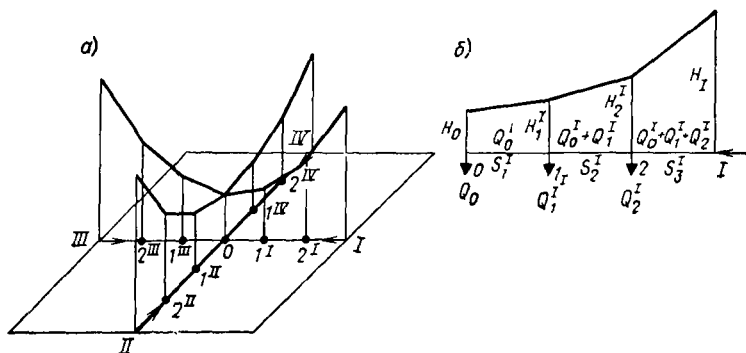


Рис. 58. Расчетная схема нефиксированного отбора воды из водопроводной сети  
 а — схема сети; б — пьезометрическая линия на участке сети 0—1

с одним направлением притока воды. При подаче в устройство, расположенное на участке кольцевой водопроводной сети, водоотдача увеличивается примерно в 2 раза, а при подаче воды в устройство, расположенное в узле водопроводной сети с тремя прилегающими к узлу линиями, — в 3 раза и т. д., поэтому возможный отбор воды из водопроводной сети зависит от напора в водопроводной сети, диаметра и длины водопровода, условий подачи воды к водоразборному устройству.

Рассмотрим прием определения отбора воды из сложных водопроводных сетей с учетом условий подачи воды на противопожарные нужды. Расчетная схема отбора воды из водопроводной сети пожарными гидрантами приведена на рис. 58.

По заданным напорам  $H_I$ ,  $H_{II}$ ,  $H_{III}$  и  $H_{IV}$  в точках питания сети, по значениям сопротивлений участков водопроводных линий и устройствам отбора (гидрант — колонка — всасывающая линия в пожарный автонасос) определяют минимально допустимый напор в «диктующей» точке  $O$  и расходы воды в точках  $O$ ,  $1^I$ ,  $1^{II}$ ,  $1^{III}$ ,  $1^{IV}$ ; точках  $2^I$ ,  $2^{II}$ ,  $2^{III}$ ,  $2^{IV}$  и т. д.

Расход в точке  $O$  определяют по формуле:

$$Q_0 = P_0 \sqrt{H_0}, \quad (P_0 = \sum_1^m P_m),$$

где  $P_0$  — проводимость питающих направлений;  $H_0$  — напор в точке  $O$  (неизвестная величина).



Для решения задачи проводимость  $\Pi_0$  распределяют по основным направлениям (для направления О-I проводимость составляет  $\Pi_I$ , для направления О-II—IIII и т. д.) Тогда расход

$$\begin{array}{ll} \text{по направлению} & \dots \dots \dots \text{О-I} \quad Q_0^I = \Pi_I \sqrt{H_0}, \\ \text{»} & \text{»} \quad \dots \dots \dots \text{О-II} \quad Q_0^{II} = \Pi_{II} \sqrt{H_0}. \end{array}$$

После этого определяют полный расход

$$Q_m = \sum_I^m Q_0^m = \sum_I^m \Pi_m (\sqrt{H_0}), \left( \sum_I^m \Pi_m = \Pi_0 \right).$$

Поскольку расход пропорционален проводимости, распределение потока воды в направлениях можно заменить распределением проводимостей. Для этого вводят условные проводимости для каждого направления. Прием определения условной проводимости показан для направления О-I:

потери напора на участке 0—1<sup>I</sup>

$$h_1^I = s_1^I (Q_0^I)^2 = s_1^I \Pi_1^2 H_0;$$

напор в точке 1<sup>I</sup>

$$H_1^I = H_0 + h_1^I = H_0 (1 + s_1^I \Pi_1^2),$$

расход в точке 1<sup>I</sup>

$$Q_1^I = \Pi_0 \sqrt{H_1^I} = \Pi_0 \left( \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2} \right) \sqrt{H_0}.$$

(41)

Потери напора на участке 1<sup>I</sup>—2<sup>II</sup>

$$h_2^I = s_2^I (Q_0^I + Q_1^I) = s_2^I (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2})^2 H_0;$$

напор в точке 2<sup>I</sup>

$$H_2^I = H_1^I + h_2^I = \left[ (1 + s_1^I \Pi_1^2) + s_2^I (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2})^2 \right] H_0;$$

расход в точке 2<sup>I</sup>

$$Q_2^I = \Pi_0 H_2^I =$$

$$= \Pi_0 \sqrt{\left( 1 + s_1^I \Pi_1^2 \right) + s_2^I \left( \Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2} \right)^2} \sqrt{H_0}.$$

(42)

Потери напора на участке 2<sup>I</sup>—1

$$\begin{aligned}
 h_3^I &= s_3^I (Q_0^I + Q_1^I + Q_2^I)^2 = s_3^I \left[ (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2}) + \right. \\
 &\quad \left. + \Pi_0 \sqrt{(1 + s_1^I \Pi_1^2) + s_2^I (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2})^2} \right]^2 H_0; \\
 \text{напор в точке 1} \\
 H_1 &= H_2^I + h_3^I = \left\{ \left[ (1 + s_1^I \Pi_1^2) + s_2^I (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2})^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + s_3^I \left[ (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2}) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \Pi_0 \sqrt{(1 + s_1^I \Pi_1^2) + s_2^I (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2})^2} \right]^2 \right\} H_0.
 \end{aligned} \tag{43}$$

Значение  $H_1$  известно, поэтому можно написать

$$H_1 = \alpha_1 H_0 = f_1(\Pi_1) H_0,$$

где

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 = f_1(\Pi_1) &= \left\{ \left[ (1 + s_1^I \Pi_1^2) + s_2^I (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2})^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + s_3^I \left[ (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2}) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \Pi_0 \sqrt{(1 + s_1^I \Pi_1^2) + s_2^I (\Pi_1 + \Pi_0 \sqrt{1 + s_1^I \Pi_1^2})^2} \right]^2 \right\}.
 \end{aligned}$$

Число таких уравнений соответствует числу направлений:

$$\left. \begin{aligned}
 \Pi_I + \Pi_{II} + \Pi_{III} + \Pi_{IV} &= \Pi_0; \\
 H_I &= \alpha_I H_0 = f_I(\Pi_I); \\
 H_{II} &= \alpha_{II} H_0 = f_{II}(\Pi_{II}). \\
 &\dots \dots \dots
 \end{aligned} \right\}$$

Приведенные формулы являются алгоритмом для расчета отбора воды из сложных водопроводных сетей с использованием ЭЦВМ.

При ручном расчете применяют итеративный прием. Для этого получают зависимости  $\alpha = f(\Pi)$  для каждого направления. Затем из условия  $\Sigma \Pi = \Pi_0$  задают величины  $\Pi_I, \Pi_{II}, \Pi_{III}$  и т. д. (проще всего сначала принять  $\Pi_I = \Pi_{II} = \Pi_{III} \dots$ ). По принятым первичным значениям  $\Pi$  находят величину  $H$  (по графику или таблице), с помощью которой определяют  $\alpha$  для различных направлений по формуле  $H_0 = H/\alpha$ . Однако при первичном подсчете окажется, что значение  $H_0$ , определенное по каж-

дому направлению, будет различно, поэтому для расчета принимают

$$H_0 = (H^I_0 + H^{II}_0 + H^{III}_0 + \dots + H^m_0) / m,$$

а затем по новому значению  $\bar{H}_0$  вновь находят значения  $\alpha$ , с помощью которых повторно вычисляют  $\Pi_I$ ,  $\Pi_{II}$ ,  $\Pi_{III}$ ... Складывая эти величины, определяют невязку по формуле

$$\Delta\Pi = (\Sigma\Pi) - \Pi_0.$$

Если  $\Delta\Pi$  окажется значительной, ее делят пропорционально  $\Pi_I$ ,  $\Pi_{II}$ ,  $\Pi_{III}$ ..., а затем вновь находят  $\alpha$  и, как показано выше, находят напоры по направлениям и среднее его значение. Таким образом, увязку продолжают до тех пор, пока  $\Delta\Pi$  не станет близка нулю.

Для приближенных расчетов отбора воды из водопроводной сети используют формулу

$$Q_{\text{пол}} = \sum_{i=1}^m \beta \sqrt{H / (s_r + s_c)},$$

где  $m$  — число направлений подачи;  $\beta = 1 + 0,02(m-1)$  — для двусторонней подачи;  $\beta = 1 + 0,01(m-1)$  — для замкнутой сети (четыре точки питания);  $H$  — начальный (до отбора) напор в водопроводной сети;  $s_r$  — сопротивление гидрантов ( $s_r = s_{0r} / n^2$ , где  $s_{0r}$  — сопротивление одного гидранта,  $n$  — число гидрантов);  $s_c$  — сопротивление водопроводной сети

## Глава 4. ПРОТИВОПОЖАРНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Многие отрасли промышленности используют воду для технологических процессов производства. На промышленном предприятии вода потребляется технологическими установками, оборудованием системы противопожарной защиты, а также рабочими и служащими для хозяйственно-питьевых нужд. Системы водоснабжения промышленных предприятий разнообразны. Структурная схема водоснабжения и параметры водопроводных сооружений зависят от требований регламента технологического процесса производства, определяющего режим расходования воды, качество очистки воды, требуемый напор в точке отбора и надежность водообеспечения.

## 1. ПОТРЕБЛЕНИЕ ВОДЫ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

На современных промышленных предприятиях вода используется для охлаждения, промывки, замочки, увлажнения, парообразования, гидротранспорта, изготовления продукции и т. п. Количество воды, требуемое для производственных нужд, определяют в зависимости от принятой схемы технологического процесса, режима работы используемого оборудования и т. п. Режим расходования воды промышленным предприятием в течение часов суток определяется графиком работы технологических установок предприятия и методами потребления воды. Интенсивность потребления воды отдельными предприятиями колеблется в течение месяцев сезона. В некоторых предприятиях потребление воды бывает практически равномерным в течение суток.

Требования потребителей к напорам воды в водопроводной сети зависят от используемого оборудования технологических линий производства, высоты производственных зданий и сооружений для размещения технологического оборудования. Для отдельных технологических агрегатов необходимо подавать воду под большим напором. Другие агрегаты технологической линии потребляют большое количество воды, подаваемой под низким напором. В связи с этим на предприятии часто применяют системы водоснабжения с местными установками для повышения напора воды до требуемого предела. Водоснабжение промышленных предприятий должно быть бесперебойным. Ряд предприятий не может допустить даже кратковременного перерыва подачи воды в технологические установки, так как нарушение режима водообеспечения приводит к серьезным авариям оборудования и катастрофическим последствиям.

## 2 СХЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Систему водоснабжения промышленных предприятий рассчитывают так, чтобы сооружения и оборудование распределяли воду требуемого качества и свойства потребителям в соответствии с требованиями технологии производства предприятий. При этом мощность водопроводных сооружений должна учитывать возрастающую потребность в воде. Если при промышленном предприятии имеется рабочий поселок или несколько предприя-

тий расположены близко друг к другу, то строят единую систему хозяйственно-противопожарного водоснабжения для указанных объектов. В подобном случае схемы водоснабжения принципиально мало отличаются от схем водоснабжения городов, рассмотренных в гл. 3 книги.

В промышленных районах иногда устраивают районные системы хозяйственно-противопожарного водоснабжения, обслуживающие несколько промышленных предприятий и населенных пунктов. В таких системах не строят отдельных водопроводных сооружений для каждого предприятия, а устраивают общую систему водопроводных сооружений, которая объединяет водозаборы, насосные и очистные станции, водоводы и др.

На промышленных предприятиях применяют следующие схемы производственного водоснабжения: прямоточные, оборотные с охлаждением воды в градирнях, брызгальных бассейнах, прудах-охладителях; с последовательным использованием воды.

В схему прямоточного водоснабжения (рис. 59) входят насосная станция, расположенная вблизи водозаборного сооружения, которая подает воду для производственных целей в цехи по водопроводной сети. Отработанная вода поступает через канализационную сеть в тот же водоем без очистки (если она не загрязнена) или при необходимости после очистки ее на очистных сооружениях. При необходимости подачи воды для производственных нужд под различным давлением в насосной станции устанавливают несколько групп насосов, подающих воду в сеть с различным напором. Для хозяйственно-противопожарных нужд поселка и цехов предприятия вода подается в самостоятельную сеть специальными насосами. Предварительно вода очищается на очистных сооружениях.

Схема оборотного водоснабжения (рис. 60) рассчитана таким образом, что использованная потребителями вода не сбрасывается в водоем (как при прямоточном водоснабжении), а вновь подается потребителям после обработки. Для пополнения утраченного количества воды (в охладительных сооружениях, при утечке и др.) в оборотный цикл добавляют свежую воду. Нагретая в процессе производственного цикла вода поступает в систему сбора и отводится на охлаждающие сооружения (градирни, брызгальные бассейны, охладительные пруды). Свежая вода поступает из источника

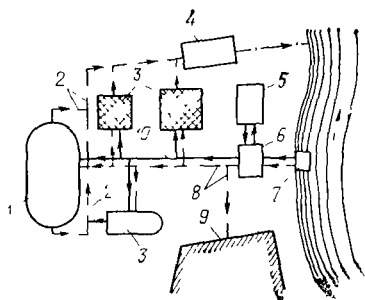


Рис 59 Схема прямооточного водоснабжения

1 — технологический комплекс (цех) предприятия 2 — канализационная сеть 3 — цех предприятия, 4 — сооружения очистки воды 5 — станция улучшения качества воды 6 — насосная станция, 7 — водозаборные сооружения, 8 — допроводная сеть, 9 — жилой поселок предприятия 10 — водопроводная сеть

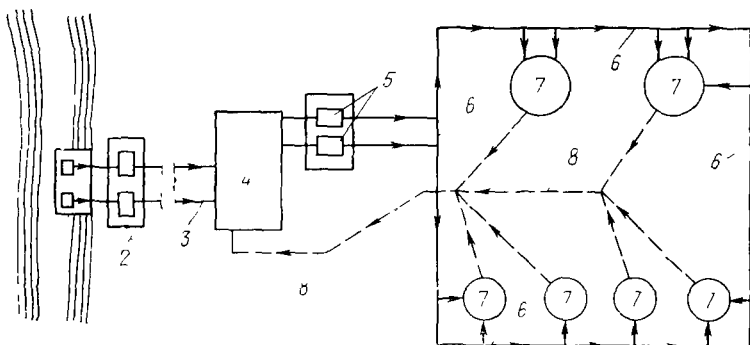


Рис 60 Схема оборотного водоснабжения

1 — водоприемные сооружения, 2 — насосная станция 3 — водоводы 4 — сооружения для охлаждения воды, 5 — насосная второго подъема, 6 — водопроводная сеть, 7 — производственные агрегаты, 8 — система сбора использованной воды

через водоприемник и подается с помощью насосов по водоводам. Количество свежей воды в таких системах составляет обычно незначительную часть (3—6%) общего количества используемой воды. Схему последовательного водоснабжения применяют в тех случаях, когда использованная одним потребителем вода может быть использована во втором, а иногда и в третьем технологическом цикле промышленного предприятия. Вода, прошедшая несколько циклов, сбрасывается через канализационную сеть в очистные сооружения. Последовательное водоснабжение занимает промежуточное положение между прямооточной и оборотной схемами водоснабжения промышленных предприятий. Количество воды, забираемой из источника, при последовательной схеме водоснабжения меньше, чем при прямо-

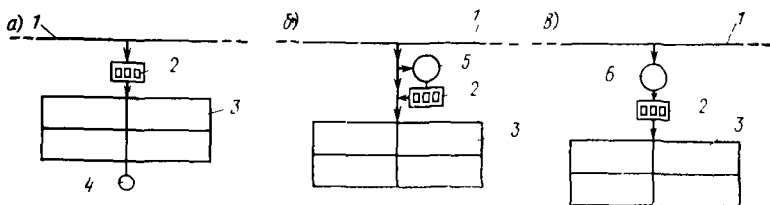


Рис. 61. Схема подключения внутризаводской водопроводной сети к городскому водопроводу

*а* — через насосы — повысители напора; *б* — через насосы — повысители напора и регулируемую емкость; *в* — через насосы — повысители и запасную емкость 1 — магистраль городской водопроводной сети, 2 — насосная с насосами-повысителями напора воды, 3 — внутризаводская водопроводная сеть 4 — водонапорная башня; 5 — регулирующая емкость; 6 — запасная емкость

точной, но больше, чем при оборотной схеме водоснабжения. Одно предприятие может иметь одну, две и больше из перечисленных систем, обслуживающих разные цехи. Система производственного водоснабжения предприятия в большинстве случаев бывает смешанной (комбинированной), состоящей из ряда систем, и представляет собой сложное хозяйство.

Хозяйственно-питьевой водопровод промышленного предприятия получает воду от общего городского или районного водопровода, а при их отсутствии предусматриваются самостоятельные источники водоснабжения. Подача воды из городской сети в хозяйственно-питьевой водопровод предприятия осуществляется по двум или нескольким вводам из различных магистральных линий городской водопроводной сети. Если требуемый свободный напор водопроводной сети предприятия превышает свободный напор водопроводной сети города, то устраивают повысительные насосные станции, а иногда и регулирующие емкости, позволяющие забирать равномерно воду из городского водопровода в течение суток. В этом случае на предприятии устраивают напорно-регулирующие сооружения (пневматические установки или водонапорные башни) для поддержания требуемого напора. Схема подключения внутризаводской водопроводной сети к городскому водопроводу показана на рис. 61, *а*, *б*, *в*.

На промышленных объектах делают противопожарные водопроводы низкого и высокого давлений. Противопожарные водопроводы низкого давления устраивают при наличии на объекте или в радиусе 3 км от него

пожарного депо. В этом случае подразделения пожарной охраны подают пожарной техникой необходимое для тушения пожара количество воды. В противном случае целесообразно предусматривать противопожарные водопроводы высокого давления. При повышенной пожарной опасности устраивают противопожарные водопроводы высокого давления, даже при наличии на объекте хорошо оснащенного пожарного депо, поскольку успех тушения пожара во многом зависит от времени начала тушения пожара. В противопожарных водопроводах высокого давления водонапорные башни в случае пожара отключают, это исключает возможность снижения давления в водопроводной сети вследствие разлива воды из бака водонапорной башни.

Если хозяйственно-противопожарный водопровод не обеспечивает возросших потребностей в воде, то на производственном водопроводе устанавливают пожарные гидранты.

Для пожаротушения используют также воду из прудов-охладителей, брызгальных бассейнов и градирен.

Для противопожарной защиты используют ситочные, капельные и мелкораспыленные (туманообразные в виде аэрозолей) струи жидкости. Струи подают операторы через пожарные стволы (как правило, при использовании передвижных технических средств подачи) и через стационарно установленные насадки или орошители.

К пожарным струям предъявляются различные требования. Например, струи для борьбы с наружными пожарами должны иметь достаточно большой радиус действия и ударную силу, а струи для стационарных установок тушения пожаров внутри помещений — достаточно развитую распыленную часть. Пожарные струи применяют для тушения пожаров, охлаждения нагреваемой поверхности, ограничения теплового излучения, снижения температуры нагретых газов, флегматизации пламени и др. Эффект действия струй в каждом конкретном случае характеризует ряд параметров, которые связаны гидравлическими закономерностями, например для сплошных струй это производительность и дальность, для раздробленных струй — плотность орошения, а для капельных и тонкораспыленных струй — дисперсность капель и скорость их движения. Для определения параметров гидравлических закономерностей струй необходимо знать методы расчета истечения жид-



кости через насадки и оросители, принципы построения траекторий струй, процессы дробления жидкости на капли.

### 3. РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРНЫХ СТРУЙ

Гидравлические параметры пожарных струй — производительность (расход), дальность полета, площадь орошения, дисперсность раздробленных (распыленных) капель, проникающая способность в очаг горения и другие определяют технические характеристики систем подачи и распределения жидкостей. В ряде случаев их нормируют и указывают в действующих нормах и правилах строительного проектирования, рекомендациях по расчету и проектированию систем противопожарной защиты. Например, при расчете пожарных водяных струй нормируют радиус (высоту) компактной части струи, при проектировании оборудования водосрошения — величину свободного напора у наиболее удаленного и высоко расположенного «диктующего» оросителя.

Общую задачу расчета из-за большого разнообразия использования пожарных струй подразделяют на ряд самостоятельных задач, характерных для каждой области применения того или иного вида установки противопожарной защиты. Наряду со специфическими особенностями, присущими каждому виду пожарных струй, все они подчиняются основным гидравлическим закономерностям истечения жидкости, с помощью которых решают три вида задач.

1. Определение необходимого напора (перед отверстием, насадком или оросителем). Если заданы производительность (расход) и параметры, характеризующие конструкцию устройства истечения и условия его подключения к распределительной системе, то функциональную зависимость напора от основных параметров выражают следующим образом:

$$H = f[q, c(d_0, \mu, j)],$$

где  $H$  — напор воды перед отверстием, насадком или оросителем,  $q$  — производительность,  $c$  — параметр, характеризующий условия истечения воды (зависит от конструкции устройства),  $d_0$  — диаметр отверстия истечения,  $\mu$  — коэффициент расхода жидкости,  $j$  — параметр, характеризующий конструкцию системы водоподачи.

Для расчета в данном случае необходимо определить параметры по имеющимся в справочной литературе коэффициентам расхода жидкости из отверстий

стандартных насадков и оросителей или рассчитать их по соответствующим формулам.

2. Определение расхода воды по заданному напору. Расчет начинают с определения гидравлического сопротивления (коэффициента расхода) отверстия насадка или оросителя и заканчивают определением производительности в зависимости от величины заданного напора.

3. Определение параметра условий истечения из отверстия, насадка или оросителя по заданному расходу (производительности) и напору. Расчет сводится к определению геометрических размеров отверстия истечения, а также основных гидравлических и геометрических соотношений элементов насадков и оросителей. Паряду с этим в задачах расчета пожарных струй выделяют самостоятельные этапы расчета:

сплошных водяных струй для тушения наружных пожаров (определение радиуса компактной части струи, дальности полета струй при разных углах наклона);

распыленных водяных струй для тушения пожаров (определение дальности полета распыленных струй в зависимости от напора и угла раскрытия распыленной струи);

площади эюоры орошения распыленными струями (проверка площади орошаемой поверхности при различных положениях оросителей);

дисперсности дробления жидкости (расчет среднего значения диаметра капель и анализ рассеивания значений этого диаметра от среднего значения);

скорости полета капель (расчет скорости, пути и продолжительности движения капель).

Эти задачи решают на основе моделей, которые представляют собой совокупность уравнений, описывающих зависимости между главными параметрами пожарных струй. Для этого выделяют фиксированные параметры, определяющие гидравлику пожарных струй, и параметры закономерностей механики дробления на капли, картины орошения и др. Таким образом, расчет пожарных струй заключается в составлении алгоритма, с помощью которого определяют параметры струй, удовлетворяющие заданным требованиям пожарной безопасности, и анализируют работу элементов системы подачи.

При построении модели расчета неизбежны погрешности, которые возникают из-за недостаточности информации, поэтому чаще используют экспериментальный

метод, особенно в тех случаях, когда неизвестны необходимые зависимости для определения параметров струй. Это позволяет намного упростить сложные математические модели или заменить их более простыми аналитическими выражениями. Тот или иной метод при решении задачи выбирают исходя из конкретных условий и имеющейся априорной информации о параметрах пожарных струй. Вместе с этим любое математическое описание является лишь приближением к реальному процессу, а поэтому встает вопрос об адекватности полученной модели расчета и необходимости ее коррекции. Решение этого вопроса также возможно при проведении экспериментов, направленных на проверку основных параметров математического описания. Таким образом, для обоснованного расчета пожарных струй используют закономерности классической гидро- и аэродинамики, параметры отдельных зависимостей в которых определяют экспериментальным путем с учетом характерных особенностей применения того или иного вида струй в пожарном деле.

Расчет водяных струй требуемой эффективности действия состоит из следующих типовых задач.

1. Определение диаметра насадка пожарного ствола, если заданы радиус компактной части струи и напор в водопроводе. Эффективность пожарных стволов характеризует радиус компактной части струи, исходя из которого по заданному напору определяют производительность ствола, а затем рассчитывают (или определяют по таблицам) требуемый диаметр его насадка.

2. Определение производительности пожарного ствола или оросителя, если задан диаметр насадка и радиус действия струи. По заданному радиусу действия струи определяют требуемый напор перед стволом или оросителем, а затем рассчитывают производительность в зависимости от найденного напора.

3. Определение напора перед насадком или оросителем, если заданы расход и диаметр отверстия истечения. Решение задачи аналогично первому виду задач истечения, в котором напор перед стволом рассчитывают в зависимости от гидравлического сопротивления насадка и расхода.

4. Определение дальности полета струй, если заданы напор перед насадком и угол его наклона к горизонту. Дальность полета струи рассчитывают исходя из максимальной высоты струи и соответствующих параметров,

характеризующих условия изменения траектории струи в зависимости от угла ее наклона.

5. Определение оптимальных режимов работы пожарных струй, отвечающих экономически наиболее выгодному варианту систем подачи воды. Решение этой задачи сводится к отысканию такого режима, который отвечал бы минимуму приведенных затрат системы подачи воды. Количественный анализ подобной задачи возможен лишь при наличии модели расчета, состоящей из математического описания связей между основными переменными процесса. Оптимальные решения находят с учетом параметров технологического и экономического характера.

Выбор оптимальных решений относится к классу вариационных задач, состоящих в решении системы уравнений со многими неизвестными при дополнительном условии, что некоторая функция этих неизвестных, называемая целевой, принимает экстремальное значение. Математическую модель проектирования системы водоподачи с оптимальными параметрами пожарных струй записывают в виде системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} F = F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; x_1, x_2, \dots, x_n) &\geq \max (\min) \\ Y_1 - Y_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\ Y_2 - Y_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ Y_n - Y_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\ u_1 - u_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\ u_2 - u_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ u_n - u_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

где  $F$  — целевая функция,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  — заданные параметры системы водоподачи и противопожарных стволов;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — искомые параметры;  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  — функция связи параметров системы водоподачи и пожарных стволов;  $u_1, u_2, \dots, u_n$  — функции общих ограничений задачи технико-экономического характера.

Составление системы уравнений (44) в условиях проектирования представляет большие трудности, а их решение возможно только при использовании вычислительной техники. В настоящее время исследуют лишь отдельные, частные задачи оптимального проектирования, ограниченные как по объему учитываемых параметров, так и по характеру их изменения.

Отдельно следует рассматривать методы расчета рас-

пыленных и мелкораспыленных капельных струй жидкости, так как их используют не только для тушения пожаров, но и для создания водяных завес, орошения и др. Эффект действия струй зависит от ряда факторов и в первую очередь от интенсивности подачи (удельного расхода), дисперсности дробления жидкости на капли и скорости движения капель. При решении конкретных задач водораспределения из многочисленных факторов необходимо отобрать сравнительно небольшое число параметров, достаточно объективно отражающих процесс, поэтому в основу расчета можно положить параметры функциональных зависимостей, определяющие гидро- и аэродинамические свойства, а также теплофизические процессы, и параметры статистических закономерностей, характеризующих вероятностные явления. При этом в первую очередь рассматривают функциональные зависимости, а случайные факторы учитывают с целью устранения неопределенностей.

Задача расчета распыленных и мелкораспыленных струй в конечном счете сводится к выбору типа оросителя (по параметрам дисперсности капель, дальности полета распыленных струй, орошаемой поверхности<sup>1</sup>); определению места расположения и ориентации оросителя относительно защищаемого объекта и установлению гидравлических параметров (напор — производительность), обуславливающих эффект работы установки. От интенсивности подачи жидкости зависят основные параметры водопроводных сооружений системы противопожарной защиты. Исходя из требуемой интенсивности подачи, определяют вид оросителей, их число, условия расположения. Интенсивность подачи рассчитывают в зависимости от производительности оросителя и площади (объема или периметра) орошаемой им поверхности.

## Истечение жидкости из пожарных стволов

Прежде чем приступить к рассмотрению закономерностей, определяющих истечение жидкости из пожарных стволов, рассмотрим простейший случай истечения из круглого отверстия в стенке резервуара при напоре истечения  $H^2$

<sup>1</sup> Эти параметры, как правило, определяют экспериментально, и они являются характеристикой данного оросителя

<sup>2</sup> Напор истечения для малого отверстия ( $d_0 \ll H$ ;  $l = d_0/2$ ) можно отнести к его центру.

Уравнение Бернулли для сечений 0—0 и 1—1 имеет вид

$$H + v_0^2/2g = v^2/2g + \xi v^2/2g,$$

где  $H$  — глубина центра тяжести сечения струи под уровнем (напор истечения),  $v$  — средняя скорость движения струи,  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления

Пренебрегая величиной  $v_0^2/(2g)$  вследствие малых значений  $v_0$ , получим

$$H = v^2/(2g) + \xi v^2/(2g) = (1 + \xi) v^2/(2g).$$

Средняя скорость в сжатом течении струи при установившемся истечении жидкости из большого открытого резервуара через круглое отверстие, согласно уравнению Бернулли, равна:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}.$$

Безразмерный коэффициент скорости  $\varphi$  определяют из выражения:

$$\varphi = 1/\sqrt{\alpha + \xi},$$

где  $\alpha$  — коэффициент кинетической энергии в сжатом сечении струи.

В случае истечения из напорного сосуда в газообразную среду напор истечения  $H$  представляет собой разность значений гидростатического напора в сосуде и в центре сжатого сечения струи:

$$H = h + (p_1 - p_2)/(\rho g),$$

где  $h$  — глубина центра сжатого сечения струи под уровнем жидкости,  $p_1$  — давление в сосуде над жидкостью;  $p_2$  — давление среды в которую вытекает струя,  $\rho$  — плотность жидкости

Если истечение происходит в атмосферу, то его напор представляет собой глубину расположения центра сжатого сечения струи под пьезометрическим уровнем в сосуде

$$H - h = p_n/(\rho g),$$

где  $p_n = p_1 - p_{ат}$  — избыточное давление в сосуде над жидкостью

Если придать насадку форму конуса, сходящегося к его выходному сечению, то получим конический сходящийся насадок, применяемый в пожарных стволах. Для таких насадков коэффициенты  $\mu$  и  $\varphi$  не равны между собой, так как при выходе из насадка происходит небольшое сжатие струи. Коэффициенты  $\varphi$  и  $\mu$  в этом случае зависят от угла конусности насадка  $\theta$ . Коэффициент расхода достигает наибольшего значения (0,946) при  $\theta \approx 13^\circ 24'$ . Коэффициент скорости по мере возрастания угла конусности увеличивается от 0,829 до 0,984.

Струя, вытекающая из конических насадков, обладает наибольшей удельной кинетической энергией вследствие малой величины гидравлических сопротивлений ( $\Sigma \xi = 0,06 - 0,09$ ), а поэтому именно такие насадки применяются в пожарном деле.

Конoidalный насадок очерчивается по форме струи, вытекающей из отверстия: его входной участок имеет сложную поверхность двойкой кривизны, а выходной участок — цилиндрический. Это позволяет устранить сжатие струи жидкости при выходе из насадка и получить еще большую кинетическую энергию струи при  $\mu = \varphi = 0,97 - 0,99$  (в зависимости от напора и качества обработки внутренней поверхности насадка).

Максимальной удельной кинетической энергией обладает струя из конoidalного насадка. Большую кинетическую энергию имеют также струи, вытекающие через конический сходящийся насадок.

### Коэффициент расхода жидкости из пожарного ствола

Для сечений 1, 2 и  $N$ , обозначенных на рис. 62, можно получить следующие соотношения для потока через направляющий ствол и насадок:

$$\left. \begin{aligned} H_{10} &= P_1/(\rho g) + \alpha_1 v_1^2/(2g) = (1 + \xi_n + \xi_p) v_n^2/(2g); \\ H_{20} &= P_2/(\rho g) + \alpha_2 v_2^2/(2g) = (1 + \xi_n) v_n^2/(2g), \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

где  $H_{10}$ ,  $P_1$  и  $v_1$  — полный напор истечения, гидростатическое давление и средняя скорость на входе в направляющую ствола,  $H_{20}$ ,  $P_2$  и  $v_2$  — напор, гидростатическое давление и средняя скорость на входе в насадок,  $v_n$  и  $\xi_n$  — средняя скорость и коэффициент сопротивления насадка,  $\rho$  — плотность воды;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты кинетической энергии, учитывающие неравномерность распределения скоростей на входе в направляющую ствола и насадок.

Из этих уравнений можно получить формулу для средней скорости в насадке:

$$v_n = \mu_0 (2gH_{10})^{1/2} \text{ и } v_n = \mu_{n0} (2gH_{20})^{1/2}; \quad (46)$$

$$\mu_0 = 1/(1 + \xi_n + \xi_p)^{1/2} \text{ и } \mu_{n0} = 1/(1 + \xi_n)^{1/2}, \quad (47)$$

где  $\mu_0$  и  $\mu_{n0}$  — коэффициенты расхода жидкости из насадка вместе с направляющей ствола и из одного насадка.

Величины  $\xi_n$  и  $\xi_p$  малы по сравнению с единицей, поэтому уравнения (47) можно свести к виду

$$\mu_0 = 1 - [\xi_n + \xi_p]/2 \text{ и } \mu_{n0} = 1 - [\xi_n/2]. \quad (48)$$

Если коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в уравнении (45) принять равными единице, то величины  $H_{10}$  и  $H_{20}$  можно выразить соответственно через  $H_1$  и  $H_2$ . Коэффициенты расхода будут определяться по формулам

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 (H_{10}/H_1)^{1/2} \text{ и} \\ \mu_n &= \mu_{n0} (H_{20}/H_2)^{1/2}. \end{aligned} \quad (49)$$

Используя соотношение (45) и условие, что  $\alpha_1 = \alpha_2 \approx 1$ , из уравнений (49) получим формулы для кажущегося коэффициента расхода жидкости из насадка (с учетом потерь в направляющей ствола):

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 + (\alpha_1 - 1) m_1^2/2, \quad \mu_n = \mu_{n0} + (\alpha_2 - 1) m_2^2/2; \\ \mu_n - \mu &= \mu_{n0} - \mu_0 + \{m_2^2(\alpha_2 - 1) - m_1^2(\alpha_1 - 1)\}/2, \end{aligned} \quad (50)$$

где  $m_1 = (D_n/D_1)^2$ ,  $m_2 = (D_n/D_2)^2$ .

Гидравлические характеристики пожарных стволов непосредственно связаны с начальной турбулентностью, которая определяет условия течения внутри насадка. Определение характеристик истечения из противопожарных стволов затруднено тем, что насадки имеют различные форму проточной части и чистоту обработки поверхности. Часто насадок заменяют упрощенной моделью, имеющей профиль трубы постоянного диаметра с эквивалентной длиной  $l_n$ , потери в которой принимают такими же, что и в реальном насадке. При этом на входе скорости потока распределяются равномерно и пограничный слой в нем отсутствует. Предполагают также, что вязкостные эффекты существуют только в пределах пограничного слоя, толщина которого мала по сравнению с диаметром насадка (рис. 63). Если предположить, что шероховатость поверхности насадка оказывает незначительное влияние на течение, то в результате такого упрощения для полностью ламинарного пограничного слоя можно записать:

$$\delta^*_{n0} = 43,942 l_n / (v_n l_n / \nu)^{1/2} = 87,376 (D_n/2) (\eta/Re)^{1/2}, \quad (51)$$

где  $\delta^*_{n0}$  — толщина вытесняющего пограничного слоя;  $l_n$  — эквивалентная длина насадка;  $v_n$  — средняя скорость в насадке;  $\nu$  — кинематическая вязкость воды;  $D_n$  — диаметр выходного отверстия насадка;  $\eta = l_n/D_n$ ;  $Re = v_n D_n / \nu$  — число Рейнольдса.

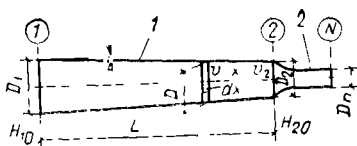


Рис 62 Расчетная модель пожарного ствола  
Ствол пожарный лафетный комбинированный  
1 — направляющая ствола, 2 — насадок



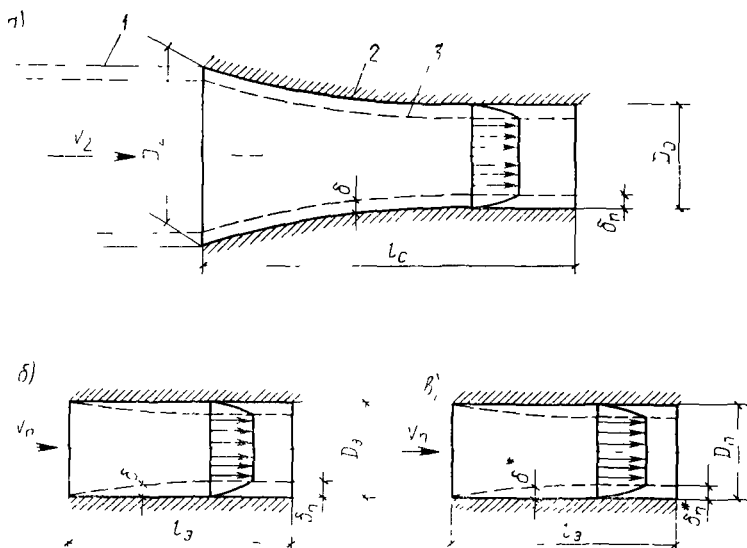


Рис 63 Расчетная модель насадка

*a* — реальный насадок, *б* — эквивалентный насадок, *в* — эквивалентный насадок 1 — направляющая ствола, 2 — насадок 3 — пограничный слой

Таким образом, коэффициент расхода жидкости из насадка определяют соотношением

$$\mu_{n0} = \pi [(D_n/2 - \delta^*)^2 / (\pi D_n^2/4)] = 1 - 6,88n^{1/2}/Re^{1/2}. \quad (52)$$

Сравнивая это соотношение со вторым соотношением в уравнениях (48), получим формулу для расчета коэффициента гидравлического сопротивления насадка

$$\xi_n = 13,76n^{1/2}/Re^{0,5}.$$

Для полностью турбулентного пограничного слоя можно записать.

$$\delta^*_n = 0,117475l_n / (v_n l_n / \nu)^{0,2} = 2,3495 (D_n/2) n^{0,8}/Re^{0,2}$$

Коэффициент расхода жидкости в этом случае определяют соотношением

$$\mu_{n0} = 1 - 0,185n^{0,8}/Re^{0,2}. \quad (53)$$

После подстановки выражения (53) во второе соотношение уравнения (48) и простейших преобразований получаем формулу для расчета коэффициента потерь на-

пора в насадке при полностью турбулентном пограничном слое

$$\xi_n = 0,37n^{0,8}/Re^{0,2}.$$

Когда пограничный слой частично ламинарный и частично турбулентный, коэффициент потерь пашора в насадке, как и в случае плоской пластины, определяют соотношением

$$\xi_n = 0,37n^{0,8}/Re - A/(n Re),$$

где  $A$  — численная постоянная, определяемая экспериментально.

В этом случае формула для коэффициента расхода жидкости принимает вид

$$\mu_{no} = 1 - 0,185n^{0,8}/Re^{0,2} + A/(2n Re). \quad (54)$$

Некоторые различия между действительными и моделируемыми условиями течения в характере распределения давлений вдоль насадка обусловлены кривизной стенок реального насадка

Значения коэффициентов расхода жидкости из пожарных стволов подробно изучены Мураками и Катамой. В результате ряда экспериментов им удалось установить основные закономерности истечения воды из насадков пожарных стволов и влияние на них конструктивных параметров ствола. Основные результаты этих исследований (в обработке автора) приведены на рис. 64. Данные показывают, что значение  $\mu_n$  зависит от  $Re$  и параметров, определяющих профиль проточной части насадка (геометрических размеров проточной части, чистоты обработки внутренней поверхности и др.) Значения  $\mu_n$  имеют максимум в определенном диапазоне чисел Рейнольдса, который исчезает по мере увеличения числа  $Re$ , и в дальнейшем ( $Re \geq 10^5$ ) значения коэффициента расхода жидкости уже не зависят от  $Re$ .

Сравнение данных, полученных по аналитически выведенным формулам, с результатами эксперимента (см. рис. 64) дает удовлетворительное совпадение лишь для насадков, которые имеют плавное очертание внутренней поверхности, способствующей образованию полностью ламинарного пограничного слоя. Ламинарный режим переходит в турбулентный при  $Re = 1 \cdot 10^5$  (для  $n = 2,5 - 5$ );  $Re = 2 \cdot 10^5$  (для  $n = 2$ );  $Re = 3 \cdot 10^5$  (для  $n = 1,5$ ) и  $Re = 4 \cdot 10^5$  (для  $n = 1$ ).

Наибольшее влияние на коэффициент расхода жидкости оказывают чистота обработки его внутренней по-

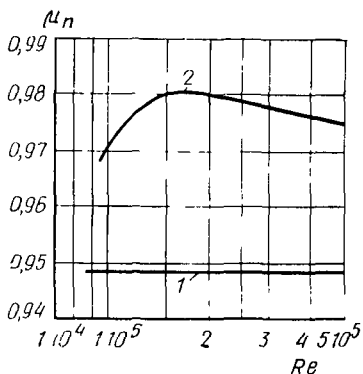
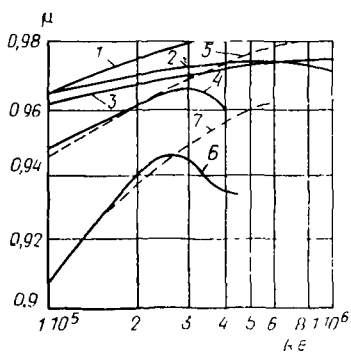


Рис 64 Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента расхода жидкости из оросителя (спринклера ОВС-12)

1 — расчетная кривая для ламинарного пограничного слоя; 2 — то же, для турбулентного пограничного слоя. 3 — то же, для частично ламинарного и частично турбулентного слоя ( $n=3$ ), 4 — экспериментальные данные для оросителя, имеющего гладкую поверхность проточной части (чистота обработки 6-й — 8-й классы по ГОСТ 2789—73), 5 — расчетная кривая для ламинарного пограничного слоя ( $n=6$ ); 6 — экспериментальные данные для оросителя с шероховатой поверхностью проточной части (чистота обработки 4-й класс по ГОСТ 2789—73); 7 — расчетная кривая для ламинарного пограничного слоя ( $n=1,7$ )

Рис 65. Зависимость коэффициента расхода жидкости от чистоты обработки внутренней поверхности насадка

1 — насадка  $D_n=25$  мм,  $n=4$ , внутренняя поверхность чистой обработке не подвергалась 2 — тот же насадка с чистой обработкой внутренней поверхности (профили шероховатости показаны на рис 66)

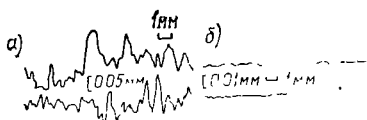


Рис 66. Профиль шероховатости внутренней поверхности насадка

а — без чистой обработки б — при тщательной механической обработке внутренней поверхности

верхности, радиус сопряжения выходной (цилиндрической) части с конической, а также профиль конической части насадка. Зависимость коэффициента расхода жидкости от степени чистоты обработки внутренней поверхности насадка показана на рис. 65 и 66. Улучшая чистоту внутренней поверхности насадка, можно увеличить коэффициент расхода жидкости с 0,95 до 0,98. Влияние шероховатости на характер течения в насадках описывают теми же законами, что и при обтекании плоской пластины (с нулевым углом атаки). Допустимую величину шероховатости (предельное значение для гидрав-

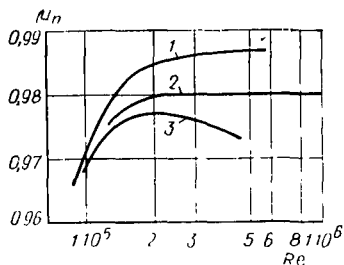
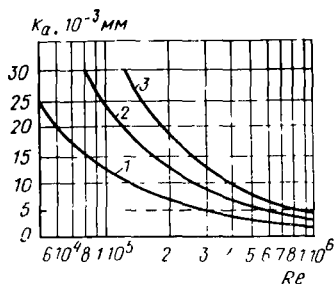


Рис 67 Зависимость величины шероховатости для гидравлически гладкой поверхности от числа Рейнольдса  
1 — насадок  $D_n=12,7$ ; 2 — 25,4; 3 — 38,1 мм

Рис 68. Зависимость коэффициента расхода жидкости из насадка ( $D_n=25$ ;  $n=4$ ) с различными профилями от числа Рейнольдса  
1 — плавный, 2 — скругленный, 3 — без скругления сопряжения конической и цилиндрической частей насадка

лически гладкой поверхности) в этом случае определяют по формуле

$$K_a = 100\nu/v_n = 100D_n/Re \quad (55)$$

График этой зависимости (рис. 67) показывает, что шероховатость внутренней поверхности (около 0,005 мм) не влияет на процесс истечения при числах Рейнольдса, превышающих значения  $Re$ , полученные пересечением кривых с прямой  $K_a=0,005$  мм (пунктирная линия на рис. 67).

Профиль насадка в конце суживающегося участка оказывает решающее влияние на характер течения в цилиндрическом участке насадка, где потери составляют большую часть. Скругление кривизны участка, расположенного перед цилиндрической частью насадка, способствует увеличению коэффициента расхода жидкости примерно на 0,5 %. Дальнейшее полирование или доводка угла не дали никакого эффекта. Зависимость коэффициента расхода жидкости из насадков, имеющих различный профиль скругления, от числа Рейнольдса показана на рис. 68 Зависимость коэффициента расхода жидкости из насадка от радиуса кривизны этого участка при  $Re=3 \cdot 10^5$  показана на рис. 69.

Зависимость коэффициента расхода жидкости от длины цилиндрической части насадка (рис. 70) показывает, что уменьшение длины цилиндрической части на-

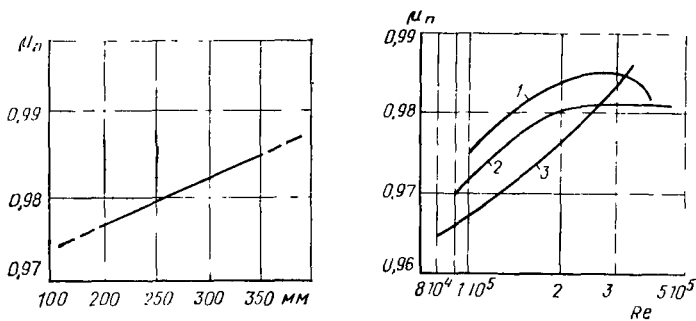


Рис. 69 Зависимость коэффициента расхода жидкости из насадка от радиуса кривизны участка перед цилиндрической частью (при  $Re=3 \cdot 10^5$ )

Рис. 70 Зависимость коэффициента расхода от длины цилиндрической части насадка

1 — длина цилиндрической части 27 мм =  $1.06D_n$ ; 2 — то же, 16 мм =  $0.8D_n$ ; 3 — то же, 18 мм =  $0.7D_n$

садка приводит к увеличению коэффициента расхода жидкости. Это положение еще раз подтверждает тот факт, что в первом случае в насадке сохраняется почти полностью ламинарный пограничный слой в диапазоне  $Re \leq 3 \cdot 10^5$ , тогда как во втором случае переход ламинарного режима в турбулентный начинается уже при  $Re = 1.5 \cdot 10^5$ . Таким образом, сокращение цилиндрической части насадка приводит к увеличению коэффициента расхода жидкости в том случае, если пограничный слой на стенке будет полностью ламинарным или полностью турбулентным.

### Потери напора в направляющей ствола

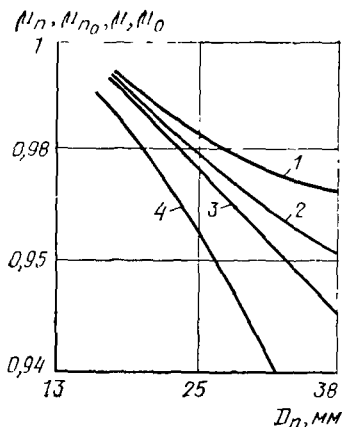
Принимая во внимание, что угол раскрытия направляющей ствола достаточно мал (примерно  $1,30^\circ$ ), потерю напора в направляющей ствола определяют по формуле

$$h_{pb} = \int_0^L \lambda (dx/D) [v^2/(2g)], \quad (56)$$

где  $\lambda$  — коэффициент трения по длине направляющей ствола. Замечая, что  $vD^2 = v_1D_1^2 = v_2D_2^2 = v_nD_n^2$ , а  $D = D_2 + 2x \operatorname{tg} \epsilon$ , и используя формулу Блазиуса для определе-

Рис. 71. Зависимость коэффициента расхода от диаметра насадка ствола (при  $Re=3 \cdot 10^5$ )

1 — кажущийся коэффициент  $\mu_n$   
 2 — истинный коэффициент  $\mu_{n0}$   
 3 — истинный коэффициент расхода  $\mu_0$  для насадка с направляющей ствола, 4 — кажущийся коэффициент  $\mu$  для насадка с направляющей ствола



ния  $\lambda$ , уравнение (56) можно привести к следующему виду:

$$h_{pb} = \lambda_n [v_n^2 / (2g)] (L/D_2) (D_n/D_2)^4 (4/15) [0/(1-0)] (1-0^{15/4}), \quad (57)$$

где  $\lambda_n = 0.3161 / (v_n D_n / \nu)^{0.25}$  — коэффициент трения по длине

Из уравнения (57) получим формулу для определения коэффициента потерь в направляющей ствола:

$$\xi_{pb} = (4/15) \lambda_n (L/D_2) (D_n/D_2)^4 [0/(1-0)] (1-0^{15/4}), \quad (58)$$

где  $\theta = D_2/D_1$ .

Экспериментальные исследования показывают, что потери напора в направляющей ствола невелики и кривые зависимости коэффициента расхода насадка почти подобны и параллельны кривым коэффициента расхода насадка с направляющей ствола. При  $Re \geq 1.5 \cdot 10^5$  коэффициент расхода не зависит от числа Рейнольдса и остается постоянным. Зависимость коэффициента расхода от диаметра насадка ствола при  $Re = 3 \cdot 10^5$  показана на рис. 71. Следует отметить весьма удовлетворительное согласие расчетных данных по формулам (48), (50) и (58) с экспериментальными. Член  $(\alpha_2 - 1)m^2_2/2 - (\alpha_1 - 1)m^2_1/2$  в уравнении (50) мал по сравнению с членом  $(\mu_{n0} - \mu_0)$ , поэтому различные направляющие стволов, присоединенные к одному и тому же насадку, имеют приблизительно одинаковые потери напора. Исключение составляют направляющие со спрямляющим аппаратом.

## Потери напора в спрямляющих лопатках

Полное сопротивление поверхностного трения спрямляющих лопаток, расположенных внутри направляющей ствола, определяют по формуле

$$l = 2z c_f b l \rho v_m^2 / (2g), \quad (59)$$

где  $z$ ,  $b$  и  $l$  — число, ширина и длина спрямляющих лопаток,  $c_f$  — коэффициент поверхностного трения,  $\rho$  — плотность воды,  $v_m$  — средняя скорость воды между спрямляющими лопатками,  $g$  — ускорение свободного падения

Коэффициент поверхностного трения в спрямляющих лопатках определяют из следующих соотношений для полностью ламинарного пограничного слоя

$$c_f = 1,328 / (v_m l \nu)^{0,5};$$

для полностью турбулентного пограничного слоя

$$c_f = 0,074 / (v_m l / \nu)^{0,2};$$

для частично ламинарного и частично турбулентного пограничного слоя

$$c_f = 0,074 / (v_m l / \nu)^{0,2} - A_0 / (v_m l / \nu),$$

где  $A_0$  — постоянная, определяющая положение точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный

Коэффициент гидравлического сопротивления в спрямляющих лопатках находят в результате преобразования уравнения (59):

$$\xi_{pr} = 2c_f z [bl / (\pi D_m^2 / 4) (D_n / D_m)^4],$$

где  $D_n$  и  $D_m$  — диаметр насадка и спрямляющих лопаток ствола

Экспериментальные данные показывают, что кажущийся коэффициент расхода жидкости из насадка ствола с направляющей или лопатками зависит от характера распределения скоростей

в подводящем к стволу трубопроводе. Зависимость кажущегося коэффициента расхода жидкости из насадка с направляющей пожарного ствола от распределения скоростей в подводящем трубопроводе представлена на рис. 72. Значения коэффициента расхода жидкости в данном случае определяли раздельно при подсоединении ствола к рукаву, стальному трубопроводу и баку. Для насадка 2 (см, рис. 72) на основании уравнения (50) можно получить  $\Delta \mu = \mu - \mu_0 =$

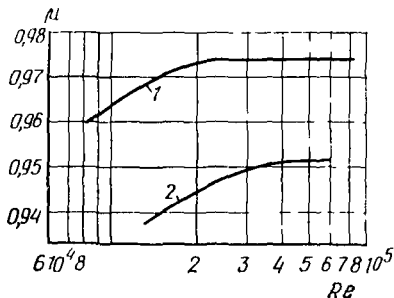


Рис. 72. Зависимость кажущегося коэффициента расхода для насадка с направляющей ствола от числа Рейнольдса

1 — насадок  $D_n = 28$  мм;  $D_n / D_m = 1,7$ ;  
2 — насадок  $D_n = 22$ ;  $D_n / D_m = 1,18$

Таблица 18. Значения  $s$  и  $A_q$  при  $\mu=1$

$D_n$ , мм	$s$	$A_q$	$D_n$ , мм	$s$	$A_q$
10	8,6	0,348	28	0,134	2,73
13	2,89	0,588	32	0,079	3,56
17	9,99	1,01	35	0,055	4,26
19	0,634	1,26	38	0,04	5,02
22	0,353	1,68	40	0,032	5,57
25	0,212	2,17	50	0,0132	8,7

$=0,00348 (\alpha_1 - 1)$ ,  $m^2_1 = 0,00696$ , т. е.  $\Delta\mu = 0$ , а это означает, что кажущийся и истинный коэффициенты расхода жидкости равны. Коэффициент кинетической энергии  $\alpha$  определяют, если известно распределение скоростей в поперечном сечении трубопровода. На большом расстоянии от входа прямолинейного трубопровода эта величина (для турбулентного течения) будет

$$\alpha = 1 + 2,7\lambda, \quad (60)$$

где  $\lambda$  — коэффициент трения подводящего трубопровода.

В случае присоединения пожарного ствола к стальному трубопроводу уравнения (50) и (60) дают следующее выражение:

$$\Delta\mu = \mu - \mu_0 = 2,7\lambda m^2_1 / 2 = 0,03375 m^2_1.$$

Расход воды из насадков пожарных стволов.

Для решения ряда практических задач подачи воды (при  $10^5$ ) через пожарные стволы пользуются формулой

$$H = q^2 / (\mu^2 F^2_n 2g).$$

Обозначив

$$1 / (\mu^2 F^2_n 2g) = s,$$

получаем

$$H = sq^2.$$

Расход воды из насадка представляют в виде:

$$q = A_q \sqrt{H} \quad (\text{при } Re \geq 10^5),$$

где  $A_q$  — коэффициент производительности насадка, равный  $\mu F_n \sqrt{2g}$ ;  $H$  — напор у насадка.

Для приближенных вычислений в табл. 18 приведены значения сопротивлений  $s$  и коэффициентов  $A_q$  для  $q$  (л/с) и  $\mu = 1$ .



Расход воды в зависимости от напора приведен в табл. 19.

Таблица 19. Расход воды из насадков (при  $\mu=1$ )

Напор, м	Расход воды из насадков (л/с) при $D_n$ (мм), равном									
	13	16	19	22	25	28	32	38	41	50
20	2,6	3,9	5,5	7,5	9,7	12,2	15,9	22,4	30,1	38,8
25	2,9	4,4	6,2	8,4	10,8	13,7	17,8	25	33,7	43,5
30	3,2	4,8	6,8	9,2	11,8	14,9	19,5	27,5	36,9	47,6
35	3,4	5,2	7,3	9,9	12,8	16,2	21,1	29,7	39,9	51,5
40	3,7	5,5	7,9	10,6	13,6	17,3	22,5	31,7	42,6	55
45	3,9	5,9	8,3	11,3	14,5	18,3	23,9	33,6	45,1	58,7
50	4,1	6,2	8,8	11,8	15,3	19,3	25,1	35,5	47,6	61,5
55	4,3	6,5	9,2	12,4	16	20,2	26,4	37,2	50	61,5
60	4,5	6,8	9,8	13	16,7	21,2	27,6	38,9	52,2	67,4
65	4,7	7,1	10	13,5	17,4	22	28,7	40,5	54,3	70,1
70	4,9	7,3	10,4	14	18,1	22,8	29,8	42	56,4	72,7
75	5,1	7,6	10,7	14,5	18,7	23,6	30,8	43,4	58,3	75,3
80	5,3	7,9	11,1	15	19,3	24,4	31,8	44,9	60,2	77,7

### Истечение жидкости из оросителей

Расход жидкости из оросителей (производительность) определяют в зависимости от напора в распределительной сети, на которой их устанавливают. Условия подвода жидкости к оросителям на распределительных трубопроводах с большими скоростями транзитных потоков оказывают влияние на процесс истечения. Расчетная схема изменения напора потока и его составляющих при движении жидкости через конический насадок спринклера показана на рис. 73.

Коэффициенты расхода жидкости из конической и цилиндрической частей спринклера (сечения 1 и 2) определяют аналогично коэффициентам расхода жидкости из пожарного ствола по формулам (45) — (51).

Теоретические исследования истечения воды из оросителей затрудняются тем, что гидравлические параметры в значительной степени зависят от профиля насадка, длины проточной части, соотношения диаметров выходного и входного отверстий, шероховатости внутренней поверхности, радиусов сопряжения и др. Полагая, что скорости распределены равномерно, а также то, что поток является невязким и вязкостные эффекты существуют лишь в пределах пограничного слоя, толщина которого мала по сравнению с диаметром насадка, можно использовать формулу (52) для коэффициента расхода

жидкости из насадка оросителя (для ламинарного пограничного слоя). Для полностью турбулентного пограничного слоя коэффициент расхода жидкости определяют соотношением (53). Когда пограничный слой является частично ламинарным и частично турбулентным, коэффициент расхода жидкости из насадка оросителя вычисляют по формуле (54).

Как следует из формул, коэффициент расхода жидкости зависит от числа Рейнольдса и параметра  $n$ , характеризующего отношение длины проточной части насадка к его диаметру. Однако формулы не учитывают влияния формы проточной части, шероховатости внутренней поверхности и сопряжения конической части с цилиндрической и дают только качественную оценку коэффициента расхода.

Процесс истечения воды из спринклеров с диаметром отверстия истечения 10, 12, 17 и 22 мм был исследован автором. Зависимость коэффициента расхода жидкости из спринклера от числа Рейнольдса показана на рис 74—77. Следует отметить, что коэффициент расхода жидкости зависит также от чистоты обработки внутренней поверхности насадка оросителя, при этом характер кривых зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса сохраняется (они сдвинуты по оси ординат), а кривые для оросителей с чистотой обработки насадка по 6 и 8 классам совпадают. Влияние шероховатости на величину коэффициента расхода жидкости детально рассмотрено ниже. Сравнение расчетных значений коэффициента расхода жидкости с экспериментальными данными представлено на рис. 75. Приведенные данные показывают, что экспериментальную кривую 4 можно аппроксимировать формулой

$$\mu = 1 - 16,7 \text{Re}^{0,5} (1 \cdot 10^5 \leq \text{Re} \leq 3 \cdot 10^5),$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода жидкости из спринклера ОВС 12 (с чистотой обработки внутренней поверхности насадка не ниже 6 класса по ГОСТ 2789—73),

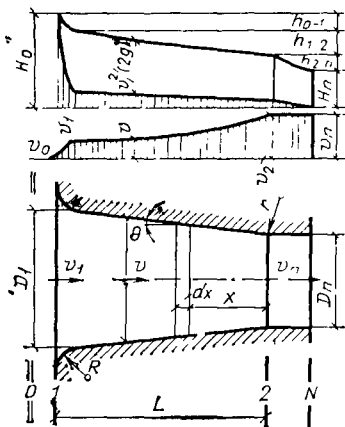


Рис. 73 Расчетная схема изменения напора потока и его составляющих при движении жидкости через конический насадок спринклера

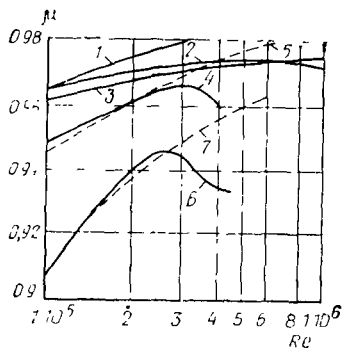
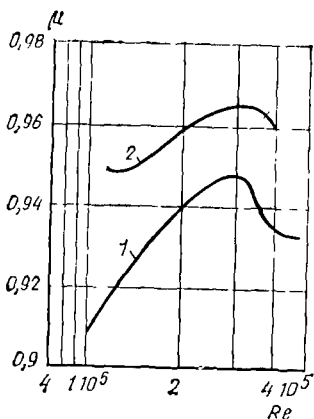


Рис. 74 Зависимость коэффициента расхода жидкости из спринклера числа Рейнольдса

1 — чистота обработки внутренней поверхности насадки по 1 му классу, 2 — то же, по 6 му и 8 му классам чистоты обработки

Рис. 75 Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента расхода жидкости для оросителей

1 — расчетная кривая для ламинарного пограничного слоя, 2 — то же для турбулентного пограничного слоя, 3 — то же для частично ламинарного и частично турбулентного слоя ( $n=3$ ), 4 — экспериментальные данные для оросителя имеющего гладкую поверхность проточной части (чистота обработки 6 й—8 й классы по ГОСТ 2789—73) 5 — расчетная кривая для ламинарного пограничного слоя ( $n=6$ ), 6 — экспериментальные данные для оросителя с шероховатой поверхностью проточной части (чистота обработки 4 й класс по ГОСТ 2789—73), 7 — расчетная кривая для ламинарного пограничного слоя ( $n=1.7$ )

Коэффициент расхода жидкости из спринклера (с чистотой обработки внутренней поверхности насадка по 4 классу) определяют по формуле

$$\mu = 1 - 28,2/Re^{0,5} (1 \cdot 10^5 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5)$$

Для оценки степени влияния геометрических параметров на коэффициент расхода жидкости примем, что угол раскрытия образующей проточной части насадка оросителя достаточно мал и потери напора в ней можно представить в виде выражения (56). Формула для определения коэффициента расхода жидкости из оросителя, учитывающая геометрические параметры, может быть получена при подстановке выражения (58) в уравнение (48):

$$\mu = 1 - \{6,88n^{0,5}/Re^{0,5} + 0,0848(D_n/D_2)^5/Re^{0,25} [0/(1-0)] (1-0^{15/4})\}$$

Численный анализ коэффициента  $\xi_n$  показывает, что его влияние на коэффициент расхода жидкости из оро-

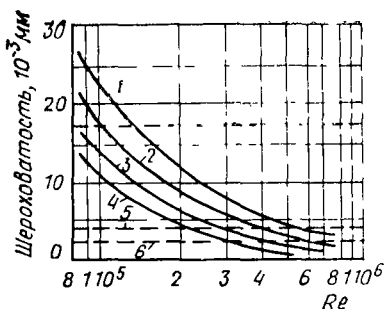
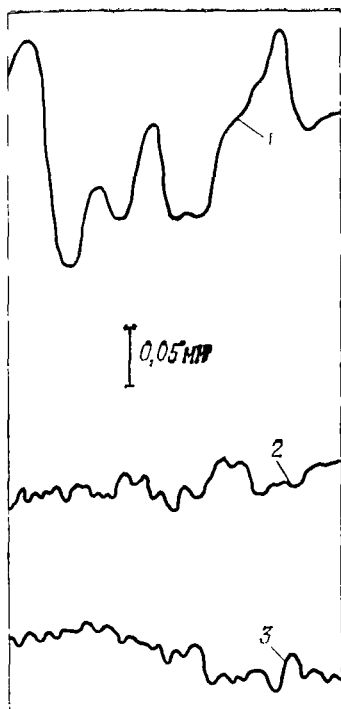


Рис 77 Зависимость предельной величины гидравлически гладкой внутренней поверхности насадка оросителей от числа Рейнольдса

1 —  $D_n=22$ ; 2 —  $D_n=17$ ; 3 —  $D_n=12$   
 4 —  $D_n=10$ ; 5 — шероховатость внутренней поверхности по 6 классу,  
 6 — то же, по 8 классу, 7 — то же по 4 классу чистоты обработки по ГОСТ 2789-73

Рис 76 Профилограмма внутренней поверхности насадка спринклера

1 — чистота обработки по 1 классу, 2 — то же по 6 классу, 3 — то же, по 8 классу чистоты обработки по ГОСТ 2789-73

сителя незначительно и сказывается лишь в четвертом знаке. Исследования показывают также, что геометрические параметры насадка оросителя оказывают значительно меньшее влияние на коэффициент расхода жидкости, чем шероховатость внутренней поверхности насадка и режим истечения. Степень влияния шероховатости внутренней поверхности насадка оценивали по экспериментальным данным, характеризующим зависимость коэффициента расхода жидкости от чистоты обработки внутренней поверхности проточной части спринклера. На рис. 76 приведены профилограммы внутренней поверхности насадков для этих спринклеров по 4, 6 и 8 классам чистоты обработки. Улучшая чистоту обработки проточной части, можно увеличить коэффициент расхода жидкости, однако существует определенный предел, при котором дальнейшее улучшение чистоты обработки внутренней поверхности насадка (например, больше чем 6 класс чистоты обработки) не дает увели-

чения пропускной способности оросителя. Численное значение этого предела определяют по формуле (55). Зависимость предельной величины гидравлически гладкой поверхности от числа Рейнольдса для оросителей ОВС с различными отверстиями истечения показана на рис. 77. Экспериментальные данные (см. рис 77) подтверждают снижение коэффициента расхода жидкости из оросителя ОВС-12 в том случае, когда фактическая шероховатость ( $16,8 \cdot 10^{-3}$  мм) превышает предельную величину гидравлически гладкой поверхности ( $4 \times 10^{-3}$  мм).

Коэффициент расхода жидкости из оросителя струйного типа, представляющего собой как бы систему круглых отверстий истечения, определяют в зависимости от числа Рейнольдса. Результаты экспериментальных исследований коэффициента расхода жидкости из струйных оросителей аппроксимированы автором формулой

$$\mu = 1 - (n/Re^{0,2} - A/Re),$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода жидкости,  $n$  и  $A$  — параметры, определяемые экспериментально,  $Re$  — число Рейнольдса.

Производительность (расход воды) оросителя характеризует коэффициент производительности (проводимость)  $A_q$ , который (для квадратичной зоны) определяют по формуле

$$A_q = q / \sqrt{H},$$

где  $q$  — производительность оросителя, м<sup>3</sup>/с,  $H$  — полный напор истечения на входе в ороситель, м.

Иногда производительность оросителя (в зависимости от напора) выражают характеристикой истечения  $B_q = q^2/H$ . Таким образом, для вычисления производительности оросителей по полному напору истечения  $H$  имеем

$$q = A_q \sqrt{H} = \sqrt{B_q H}.$$

Величины  $A_q$  и  $B_q$  зависят от диаметра выходного отверстия, конструкции оросителя, места расположения оросителя на распределительном трубопроводе и режима истечения. Значение коэффициентов  $A_q$  и  $B_q$  в квадратичной зоне истечения определяют по формулам

$$A_q = \mu \omega \sqrt{2g}; \quad B_q = 2g\omega^2 \mu^2,$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода жидкости из оросителя,  $\omega$  — площадь отверстия истечения.

Производительность центробежного оросителя находят по формуле

$$q = \mu \sqrt{\varphi^2 / (2 - \varphi)} \omega \sqrt{2gH},$$

где  $q$  — производительность оросителя, м<sup>3</sup>/с;  $\mu$  — коэффициент расхода,  $\varphi$  — коэффициент, характеризующий заполнение выходного отверстия жидкостью,  $\omega$  — площадь выходного отверстия, м<sup>2</sup>,  $H$  — напор перед оросителем, м.

По заданной производительности определяют гидравлические параметры оросителя и геометрические соотношения размеров вихревой камеры и выходного отверстия.

Отличительная особенность расчета эвольвентного оросителя состоит в том, что полость между наружной стенкой вихревой камеры и внутренней стенкой корпуса плавно уменьшается по ходу течения жидкости. В результате расчета подбирают такое смещение оси вихревой камеры относительно оси корпуса оросителя, при котором достигается эффект плавного и пропорционального изменения площади живого сечения. Образующая, проведенная через центры этого сечения, очень близка по форме к эвольвенте.

#### 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ СПЛОШНЫХ ВОДЯНЫХ СТРУИ

При расчете сплошных водяных струй определяют траекторию полета струй (высоту и дальность полета в зависимости от угла наклона ствола), радиус действия компактной (рабочей) части струи, реакцию струи и давление (удар струи) на орошаемую струей поверхность.

##### Высота вертикальных раздробленных струй

Если струю направить вертикально вверх, то вблизи от насадка она будет цельной, но, постепенно дробясь, на вершине будет состоять из отдельных капель. Высота, достигаемая отдельными каплями, является высотой раздробленной струи. Эта высота всегда меньше напора, под которым происходит ее истечение (рис. 78). Уравнение для определения высоты струи, направленной вертикально вверх, имеет вид:

$$V_0^2 / (2g) + P_a / (\rho g) + \tau_0 = V^2 / (2g) + P_a / (\rho g) + S + \Delta S$$

Приняв за линию сравнения первое сечение ( $z=0$ ), при условии, что движение струи происходит в атмосфере

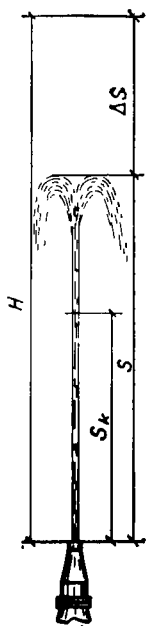


Рис 78 Схема для расчета составляющих пожарной струи

$H$  — напор у насадки (идеальная высота струи),  $\Delta S$  — потери высоты струи,  $S$  — высота вертикальной раздробленной струи,  $S_k$  — высота компактной части струи

ру  $[P_a/(\rho g)]$  в левой и правой части сокращаются] и скорость движения в конце струи  $V_1=0$ , получим

$$V_0^2/(2g) = S + \Delta S,$$

где  $V_0$  — скорость движения струи в выходном сечении насадки;  $S$  — высота струи,  $\Delta S$  — потери высоты струи в результате сопротивления воздуха, равного  $\lambda/V^2/(2dg)$ <sup>1</sup>.

Таким образом, основное уравнение высоты вертикальной струи в атмосфере имеет вид

$$S = V_0^2/(2g) = \lambda(l/d) [V^2/(2g)]. \quad (61)$$

В зависимости от того, как отнести скоростной напор  $V^2/(2g)$  и  $l$  (к фактической высоте струи  $S$  или идеальной высоте  $H$ ), получают различные варианты расчетных формул.

Принимая в расчетах идеальную высоту струи  $V_0^2/(2g) = H$ , из уравнения (61) получим общий вид формул Д'Обюссона и Фримана:

$$S = H - \lambda_1 H^2/d, \quad (62)$$

которые отличаются лишь значениями величины  $\lambda_1$ .

Принимая в расчетах фактическую высоту струи, из уравнения (61), получим формулу Мариотта (для  $\lambda_2/d = \text{const}$ ):

$$S = H - \lambda_2 S^2/d, \quad (63)$$

Принимая  $V^2/(2g) = V_0^2/(2g) = H$  и  $l = S$ , из уравнения (61), получим формулу Люгера (при  $\varphi = \lambda_3/d$ ) и формулу Вайсбаха (при  $\xi = \lambda_3 H/d$ ):

$$S = H/(1 + \varphi H); \quad S = H/(1 + \xi). \quad (64)$$

Анализируя формулы (62) — (64), выведенные из уравнения (61), можно отметить, что они различаются численными значениями  $\lambda$

<sup>1</sup> Принято, что потери высоты струи подчиняются тем же зависимостям, что и потери напора в трубах.

Для расчета высоты вертикальных водяных струй наибольшее распространение получили формулы Люгера и Фримана. Фриманом была предложена формула

$$S = H(1 - 1,13H/d \cdot 10^{-4}), \quad (65)$$

где  $S$  — высота вертикальной раздробленной струи, м;  $H$  — напор, м,  $d$  — диаметр выходного отверстия истечения, мм.

Формула Люгера имеет вид

$$S = H/(1 + \varphi H), \quad (66)$$

где

$$\varphi = 2,5 \cdot 10^{-4} / (d_0 + 1000d^3).$$

Ниже приведены значения коэффициента  $\varphi$  в зависимости от диаметра насадка:

$d$ , мм	13	16	19	22	25	28	32	38	50
$\varphi$	0,016	0,012	0,01	0,008	0,006	0,005	0,0038	0,0027	0,0014

Потерю высоты струи  $\Delta S$  определяют по формуле В. Г. Лобачева:

$$\left. \begin{aligned} \Delta S &= H - S = K_1 V^2 S / (2gd); \\ \Delta S &= K_2 V^2 H / (2gd), \end{aligned} \right\}$$

где  $\Delta S$  — потеря высоты струи,  $V$  — средняя скорость потока при выходе струи из насадка,  $d$  — диаметр насадка,  $H$  — напор,  $S$  — высота вертикальной раздробленной струи,  $K_1$  и  $K_2$  — коэффициенты, определяемые экспериментально

Анализируя формулы (65) и (66), видим, что они являются частными случаями формул В. Г. Лобачева и отличаются значениями коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ :

$$\begin{aligned} K_1 &= d(1/S - 1/H); \\ K_2 &= d(1/H - S/H^2). \end{aligned}$$

Если разложить формулу Люгера в ряд геометрической прогрессии и проверить удовлетворение условия сходимости на цифровом материале, можно показать, что формула Фримана является первым приближением формулы Люгера, если считать, что коэффициенты в этих формулах одинаковы. Практическое же совпадение результатов вычислений по обеим формулам объясняется тем, что Фриман компенсировал невязку постоянным коэффициентом  $\lambda_1 = 0,000113$ . Однако значения  $\lambda$  не являются постоянной величиной и зависят от

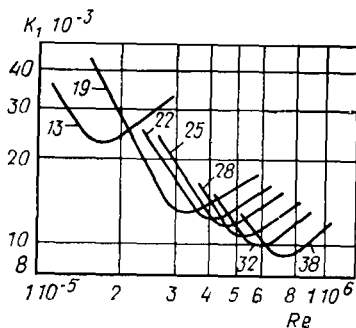


Рис 79 Зависимость параметра  $K_1$  от числа Рейнольдса  $Re$  на кривых — диаметр выходного отверстия насадка



ряда гидравлических параметров, поэтому результаты расчетов по формуле Фримана приближенные. Между значениями  $K_1$  и  $K_2$  существует зависимость:

$$K_1/K_2 = H/S.$$

Определение потерь высоты струи является одной из основных задач гидравлики пожарных струй. Зависимость параметра  $K_1$  от  $Re = 34d\sqrt{H} \cdot 10^5$  показана на рис. 79.

### Влияние шероховатости внутренней поверхности насадков на высоту струи

Выразив значение  $K_1$  как функцию шероховатости внутренней поверхности насадка  $e$   $K_1 = f(e/r)$  и приняв определенный диаметр насадка за эталон  $d_0$ , а соответствующее ему значение  $K_1^{(0)} = f(e/r_0)$ , получим выражение для величины любого другого насадка  $d_x$ :

$$\begin{aligned} K_1^{(x)} &= K_1^{(0)} f(e/r_x) / f(e/r_0) = K_1^{(0)} \varphi(r_0/r_x) = \\ &= K_1^{(0)} \varphi(d_0/d_x) = K_1^{(0)} \sqrt{d_0/d_x}. \end{aligned}$$

Выражение для  $K_1$  можно записать в следующем виде:

$$K_1 = a \sqrt{d_0/d_x} f(\sqrt{H}).$$

Приняв  $a = b/\sqrt{2e}$ , получим

$$K_1 = b \sqrt{d_0/2e} f(\sqrt{H}) / \sqrt{d_x} \quad (67)$$

Обработка экспериментальных данных показывает, что выражение (67) в общем виде можно записать следующим образом

$$K_1 = \text{const} f(\sqrt{H}) / \sqrt{d_x}.$$

Величину  $K_1^{(0)}$  В. Г. Лобачев предложил аппроксимировать формулой

$$K_1^{(0)} H \sqrt{d_x} \cdot 10^6 = \exp(5,42 + 0,0304H). \quad (68)$$

Принимая это во внимание, получим

$$S = H / [1 + \exp(5,42 + 0,0304H)] / (10^6 \cdot \sqrt{d_0^3}).$$

Анализ экспериментальных данных на ЭЦВМ позволил уточнить известные зависимости для определения

высоты раздробленных водяных струй и получить более точные результаты, чем по формулам Фримана и Люгера. В общем виде эту зависимость для удобства расчетов можно представить общей формулой

$$S = H / (1 + \beta),$$

где  $\beta = 2.5 \cdot 10^{-4} H / (d + 1000 d^3)$  (в формуле Люгера),  $\beta = (1.13 \cdot 10^{-4} H / d) / (1 - 1.13 \cdot 10^{-4} H / d)$  (в формуле Фримана);  $\beta = [\exp(a \cdot bH)] / \sqrt[3]{d^3 \cdot 10^3}$  в формуле (68)

## Влияние напора на высоту вертикальной струи

Высота вертикальной струи заметно возрастает по мере увеличения напора до определенного предела. После этого предела увеличение напора дает лишь незначительный рост высоты струи. Анализируя формулы (61) и (62) на экстремум (рассматривая как функцию переменной  $H$ ), после дифференцирования и приравнивания первой производной нулю получим уравнения

$$\left. \begin{aligned} dS/dH = 1 - \lambda/d = 0; \\ dS/dH = 1 - 2\lambda_1 H/d = 0. \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

Разделив одно уравнение на другое, получим максимальное значение  $S^*$  при  $H = \text{const}$ :

$$S_* = 2H\lambda_1/\lambda. \quad (70)$$

Из формулы (70) видно, что максимальная высота вертикальной струи представляет собой удвоенный скоростной напор, умноженный на соотношение  $\lambda_1/\lambda$ , поэтому уравнение (69) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} 1 &= \lambda_1 V_0^2 / (dg) = \lambda_1 t r; \\ V_0^{\text{кр}} &= \sqrt{dg/\lambda_1}. \end{aligned}$$

Значение  $V_0^{\text{кр}}$  можно принять за критическую скорость при определении критической (пределной) высоты вертикальной струи.

## Дальность полета наклонных струй

При тушении пожаров вертикальные струи применяются очень редко и здесь они рассматривались только с целью уточнения отдельных параметров, необходимых для аналитического расчета наклонных струй, применяемых в практике пожаротушения.

Если струю из ствола направить вертикально вверх, а затем постепенно наклонять ствол, то крайние капли

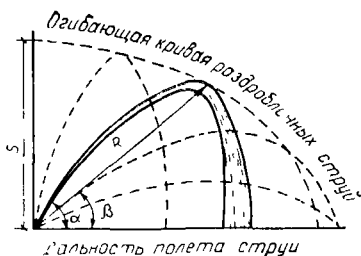


Рис 80 Схема огнивающей кривой раздробленных струй при различных углах наклона пожарного ствола

Высота и дальность полета струи зависят от угла наклона ствола.

Если бы сопротивление воздуха отсутствовало, то движение струи следовало бы закону движения брошенного тела, в соответствии с которым каждая частица описала бы параболу с ординатами (высотами) по формуле

$$y = x \operatorname{tg} \theta - gx^2(1 + \operatorname{tg}^2 \theta)/(2V_0^2),$$

где  $x$  — расстояние от точки вылета до проекции точки определяемой высоты,  $\theta$  — угол наклона ствола;  $V_0$  — начальная скорость (в точке вылета).

Дальность полета струи в этом случае определяют по формуле

$$L = V_0 \sin 2\theta / (2g).$$

Наибольшая дальность полета струи в данном случае будет при  $45^\circ$ , так как  $\sin 2\theta = 1$ .

В действительности же сопротивление воздуха значительно уменьшает дальность полета струи, причем угол  $\theta$ , при котором достигается максимальная дальность полета струй, изменяется в зависимости от величины напора у насадка.

На основании обработки опытных данных с насадками диаметром  $d = 5-16$  мм П. П. Гавыриным получена зависимость дальности полета водяных струй от трех переменных величин

$$L = 16 \sqrt[3]{\theta d H^2} = 0,415 \sqrt[3]{\theta_* d H^2},$$

где  $L$  — дальность полета струи, т. е. расстояние от насадка до центра падения наиболее мощного потока струи, м,  $\theta$  и  $\theta_*$  — угол наклона струи к вертикальной оси, рад и град соответственно  $d$  — диаметр насадка, мм,  $H$  — напор в выходном сечении, м.

струи опишут некоторую кривую (рис. 80), представляющую собой огнивающую всех струй, выходящих из ствола под определенным постоянным давлением, но под разными углами наклона к горизонту. Эта кривая является границей раздробленных струй.

Расстояние от насадка по прямой линии до граничной кривой — радиус действия раздробленных струй  $R$ . Наклонные струи зависят от

Опыты позволили установить, что при достижении определенного предела напора дальность полета струи практически не возрастает. Такую дальность полета обычно называют предельной и определяют по зависимости

$$L_* = 1,27 d^{0,94} \sqrt[4]{\theta_*} \approx 4 \sqrt[4]{\theta_*}.$$

Зная предельные значения дальности полета струи, легко определить и необходимый напор. Подставив вместо  $L$  его предельное значение  $L_*$ , получим

$$H_* = 3,75 d / \sqrt[8]{\theta_*}.$$

Следует отметить, что исследования Н. П. Гавырина проведены со стволами дождевальных установок с небольшими диаметрами насадков, поэтому приведенные выше формулы можно использовать только для приближенных расчетов пожарных струй. Для определения высоты и дальности полета водяных струй, используемых в практике пожаротушения, измеряли координаты кривых, описываемых водяными струями при различных углах наклона и напорах, перед насадком ствола. Зависимость радиуса действия струи от напора выражали кривыми. На основании этих исследований построены не только траектории, которые описывают струи после вылета из насадка, но и огибающие кривые, представляющие собой границу орошения крайними каплями раздробленной части струи. Радиус-вектор этой кривой может быть принят как функция высоты вертикальной раздробленной струи

$$\bar{R}_p = \gamma S,$$

где  $\bar{R}_p$  — радиус вектор наклонной струи,  $\gamma$  — параметр, учитывающий угол наклона радиуса действия струи;  $S$  — высота вертикальной раздробленной струи

Ниже приведены значения коэффициента  $\gamma$  для ориентировочных расчетов.

Угол наклона радиуса действия струи к горизонту, град	0	15	30	45	60	75	90
$\gamma$ . . . . .	1,4	1,3	1,2	1,12	1,06	1,02	1

Для построения огибающей кривой траекторий полета пожарных струй на основе обработки экспериментальных данных, которые представлялись в виде зави-

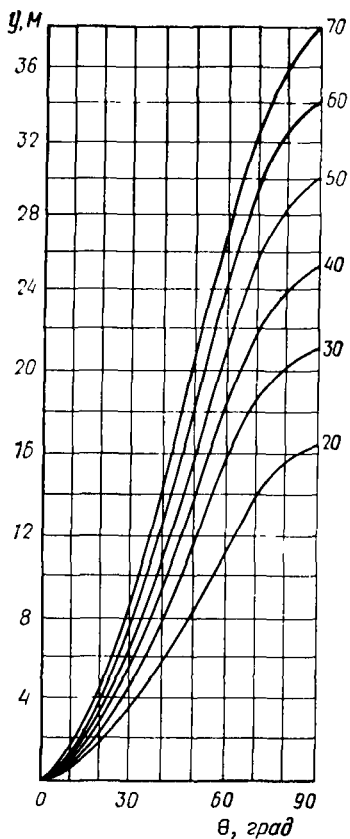


Рис 81 Зависимость абсциссы огибающей кривой компактной части струи от угла наклона и напора на входе в насадок диаметром 22 мм (цифры на кривых — напор)

симости  $x=f_2(\theta_2)$  и  $y=f_1(\theta_2)$  (рис. 81 и 82), автором на ЭЦВМ получены зависимости следующего вида:

абсцисса (длина) огибающей кривой

$$x = BH \cdot \theta \exp [-(\kappa + \nu H) \theta];$$

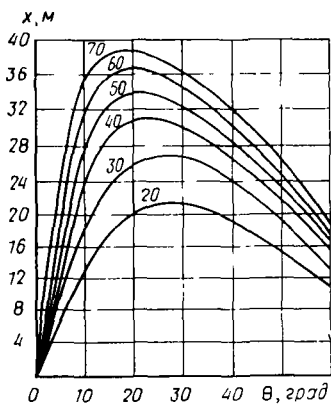


Рис 82. Зависимость ординаты огибающей кривой компактной части струи от угла наклона и напора на входе в насадок диаметром 22 мм (цифры на кривых — напор)

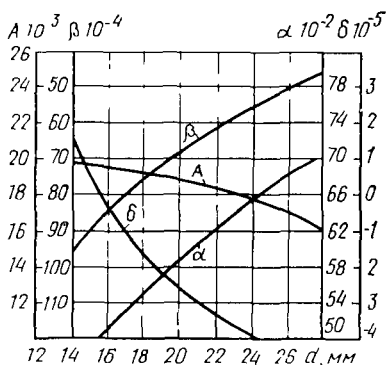


Рис 83 Зависимость параметров огибающей кривой траекторий пожарных струй от диаметра насадка ствола

ордината (высота) огибающей кривой

$$y = AH^{\alpha} \theta \exp [-(\beta + \delta H) \theta],$$

где  $H$  — напор перед насадком,  $\theta$  — угол наклона ствола к горизонту, град.;  
 $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  — параметры высоты струи, определяемые экспериментально;  
 $B$ ,  $j$ ,  $\lambda$  и  $\nu$  — параметры длины струи, определяемые экспериментально

Анализ результатов показывает, что параметры струи зависят от диаметра отверстия истечения насадка ствола, его конструкции и чистоты обработки внутренней поверхности. Зависимость этих параметров от диаметра насадка стволов показана на рис. 83. При тушении пожаров применяют не раздробленную, а компактную часть сплошной струи, которая удовлетворяет определенным требованиям. Для расчета противопожарных струй необходимо знать также и огибающую кривую компактной части струи.

### Компактная часть струи

Для разграничения компактной и раздробленной части струи Фриман определил компактную струю как такую, которая не теряет своей сплошности и не превращается целиком в «дождь» капель. В то же время эта струя должна нести не менее  $\frac{9}{10}$  всего количества воды в круге диаметром 0,38 м и  $\frac{3}{4}$  потока воды в круге диаметром 0,25 м. Вместе с этим струя не должна разрушаться при слабом ветре<sup>1</sup> и обладать достаточной силой для орошения стен и потолка помещения. Как видно, это определение условно и основано на практических соображениях применения пожарных струй, создаваемых стволами с насадками диаметром 25—38 мм. Такое определение компактности непригодно для оценки струй, получаемых из лафетных стволов большой производительности и пожарных стволов с насадками диаметром 13—22 мм, поэтому Н. А. Тарасовым-Агалаковым была введена иная характеристика для оценки компактности струй лафетных стволов. В частности, за компактную часть струи была принята такая ее часть, которая несет основную массу воды в круге диаметром 125 мм. Результаты экспериментальных исследований величины компактной части струи можно положить в основу расчета исходя из подачи воды на соответствующие рас-

<sup>1</sup> По наблюдениям Фримана, при ветре со скоростью около 4,5 м/с дальность боя струй уменьшалась примерно на 40 % из-за отбоя в сторону капель в раздробленной части струи.

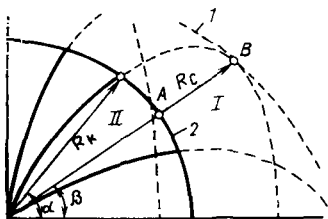


Рис 84 Схема огибающих кривых пожарных струй

1 — раздробленная струя, 2 — компактная струя, I — область раздробленных струй, II — область компактных струй

стояние и высоту. Таким образом, в большинстве случаев определяющим является радиус действия компактной части струи, по которому устанавливают остальные расчетные данные (диаметр насадка, требуемый напор и расход воды). Понятие компактной части струи дает лишь качественную оценку струй, получаемых из того или иного ствола, поэтому для характери-

стики струй пользуются понятием радиуса действия компактной части струи  $R_k$ , представляющим собой расстояние от насадка до окончания компактной части струи.

На основании опытных данных получена зависимость высоты вертикальной компактной части струи  $R_k$  от высоты вертикальной раздробленной струи  $S$ , которая выражается эмпирической формулой

$$S = \Psi R_k, \quad (71)$$

где  $\Psi \approx 1,19 + 80(0,01 R_k)^4$ .

Высота компактной части струи (на основании приведенных выше формул) может быть представлена в виде эмпирической формулы

$$R_k = K(H - 10)/(H + 10) + 0,08H + 5,7 \quad (72)$$

Используя формулы (71) и (72), В Г Лобачев получил табл. 20, с помощью которой можно установить зависимость между напором, расходом и высотой как раздробленной, так и компактной струи.

В табл. 21 приведены зависимости радиуса действия компактных струй, получаемых из лафетных стволов с диаметрами насадков 28—50 мм (при угле наклона  $30^\circ$ ), от напора и расхода.

При тушении пожаров применяют струи с различным углом наклона. Будем, как и в случае сплошных струй, изменять угол наклона ствола (при постоянном напоре), тогда крайняя точка компактной части струи опишет огибающую кривую компактной части струи (рис. 84). Линия, соединяющая насадок с любой точкой огибающей кривой (например, с точкой А), представ-

Т а б л и ц а 20. Зависимость радиуса компактной струи  $R_K$  от напора у насадка и расхода воды

Высота раз- дробленной струи $S$ , м	Напор и расход из насадков диаметром, мм											
	13		16		19		22		25			
	$H$ , м	$q$ , л/с	$H$ , м	$q$ , л/с	$H$ , м	$q$ , л/с	$H$ , м	$q$ , л/с	$H$ , м	$q$ , л/с		
14,5	19	2,6	17,5	3,8	17	5,2	16,5	6,8	16,0	8,7		
16,8	21,5	2,7	19,5	4	18,5	5,4	18,0	7,2	17,5	9,1		
17,1	24	2,9	22	4,2	20,5	5,7	20,0	7,5	19	9,6		
18,5	26,5	3	24	4,4	22,5	6,0	21,5	7,8	21	10		
19,9	29,5	3,2	26,5	4,6	24,5	6,2	23,5	8,2	22,5	10,4		
21,3	33	3,4	29	4,8	27	6,5	25,5	8,5	24,5	10,8		
22,5	37	3,6	32	5,1	29,4	6,8	28,0	8,9	27	11,3		
24,6	41,5	3,8	35,5	5,3	32,5	7,1	30,5	9,3	29	11,7		
26,4	47	4	39,5	5,6	35,5	7,5	33	9,7	31,5	12,2		
28,2	53,5	4,3	43,5	5,9	39	7,8	36,5	10,1	34,5	12,8		
30,3	61	4,6	48,5	6,2	43	8,2	39,5	10,6	37,5	13,3		
32,5	—	—	54,5	6,6	47,5	8,7	43,5	11,1	40,5	13,9		
35	—	—	61,5	7	52,5	9,1	47,5	11,7	44,5	14,5		
37,5	—	—	—	—	59	9,6	52,5	12,2	48,5	15,2		
40,4	—	—	—	—	66	10,2	58,5	12,9	53,5	15,9		
43,5	—	—	—	—	—	—	65,5	13,7	59	16,8		



Таблица 21. Зависимость радиуса действия компактной струи  $R_K$  (при наклоне  $30^\circ$ ) от напора

Напор ствола, м	Радиус действия компактной струи $R_K$ и расход $q$ при диаметрах насадков, мм							
	28		32		38		40	
	$R_K$ , м	$q$ , л/с	$R_K$ , м	$q$ , л/с	$R_K$ , м	$q$ , л/с	$R_K$ , м	$q$ , л/с
20	20	12,2	20	15,9	20,5	22,4	21	38,9
25	23	13,6	23,5	17,8	24	25,1	25	43,5
30	26	14,9	26,5	19,4	27	27,4	29	47,5
35	28	16,2	28,5	21	29,5	29,7	31	51,5
40	30	17,2	30,5	22,5	32	31,7	33	55
45	31,5	18,3	32,5	23,8	34	33,6	35,5	58,3
50	33	19,3	34	25,1	35,5	35,4	37,5	61,4
55	34,5	20,2	36	26	37	37,2	39	61,4
60	35,5	21,1	37	27,6	38	38,2	40,5	67,3
65	36,5	22	37,5	28,6	39	40,4	41,5	70
70	37	22,8	37,5	29,7	39,5	41,9	42,5	72,6

ляет собой радиус действия компактной части струи  $R_c$  под углом  $\beta$ .

Для стволов с диаметром насадка до 28 мм огибающая кривая компактной части струи близка к окружности и радиус действия компактной части струи мало зависит от угла наклона. При наклоне ствола в  $90^\circ$  радиус действия струи равен высоте вертикальной сплошной струи. При решении практических задач необходимо определить расстояние от насадка до какой-либо точки (например, точки  $B$ ) (см. рис. 84) и угол наклона  $\beta$  радиуса сплошной струи  $R_c$  к горизонту. При этом следует иметь в виду, что угол  $\beta$  меньше, чем  $\alpha$ -угол наклона ствола. Поскольку задача расчета сводится к определению диаметра насадка, напора и расхода воды для создания водяной струи, достигающей заданной точки  $B$ , то основными исходными данными для расчета будет радиус сплошной части струи  $R_c$  и угол наклона  $\beta$ .

Зависимость между высотой сплошной струи  $S$  и радиусом сплошной струи  $R_c$  на основании приведенных выше данных можно представить в виде формулы

$$R_c = fS,$$

где  $f$  — коэффициент, характеризующий радиус сплошной струи  $R_c$  в зависимости от угла  $\beta$

Ниже приведены значения коэффициента  $f$ :

$\beta$ , град	90	75	60	45	30	15	0
$f$	1	1,03	1,07	1,12	1,2	1,3	1,4

## Рабочие пожарные струи

При решении вопроса о выборе рабочей пожарной струи В. Г. Лобачевым был использован метод экспертной оценки. Для этого были опрошены более десяти опытных пожарных работников (со стажем свыше 15 лет), каждый из которых указал наиболее приемлемый диаметр насадка и напор перед ним. Обработка этих данных показала, что мнения большей части опрошенных совпали. Это и послужило основанием для характеристики рабочих пожарных струй, которая приведена ниже.

Диаметр насадка, мм . . . . .	16	19	22	25
Напор, м . . . . .	32	27	25,5	24,5
Расход, л/с . . . . .	5,1	6,5	8,5	10,8
Радиус действия, м . . . . .	18	17	17	17

Этот эксперимент показал, что рабочей является струя радиусом действия компактной части 17 м. Таким образом был определен низший предел напора рабочих пожарных струй.

## Давление пожарных струй на орошаемую поверхность

Рассмотрим удар струи о поверхность, принимая направление действия струи нормальным. После удара струя подразделяется на два потока, направленных вдоль поверхности. Силу удара определяют исходя из условия равенства импульса силы в направлении движения струи изменению количества движения. Импульс силы удара за момент времени  $d\tau$  равен  $Pd\tau$ , где  $P$  — сила удара струи. Приращение количества движения за тот же промежуток времени в направлении движения струи при изменении скорости от  $V$  до 0 равно

$$mV = \rho q d\tau V = \rho \omega V^2 d\tau,$$

где  $m$  — масса воды поступающей за время  $d\tau$ ,  $q = \omega v$  — расход воды,  $\omega$  — площадь поперечного сечения струи

Силу удара получаем из уравнения количества движения:

$$\begin{aligned} Pd\tau &= \rho \omega V^2 d\tau, \\ P &= \rho \omega V^2 = \rho q V \end{aligned} \quad (73)$$

Удельную силу удара находим из уравнения (73)

$$p = P/\omega = \rho V^2 = 2\rho g V^2/(2g).$$

Следовательно, удельная сила удара в 2 раза больше скоростного напора. Соответственно для силы удара струи имеем удвоенное гидростатическое давление

$$P = 2H\rho g\omega,$$

где принято  $V^2/(2g) = H$ .

Если струи направлены под углом  $\theta_*$  к нормали поверхности, то сила давления

$$P = \rho\omega V^2(1 - \sin \theta_*).$$

## 5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КАПЕЛЬНЫХ ВОДЯНЫХ СТРУИ

Исследованиям процессов распада и дробления жидкости на капли посвящены работы Г. Н. Абрамовича, В. И. Блинова, А. С. Лышевского и других, однако большая часть работ посвящена экспериментальным исследованиям процессов распыления жидких топлив дизельными форсунками, оросителями, установками абсорбции и десорбции и др. До настоящего времени еще не установлены обобщенные зависимости между основными параметрами распыления струй жидкости оросителями противопожарных установок. В связи с этим разработка метода, позволяющего отыскать связи между основными параметрами процесса распыления жидкости на капли, имеет важное значение для практики расчета и проектирования систем противопожарной защиты.

### Факторы процесса дробления (распыления) жидкости

Процесс дробления струи жидкости на капли обусловлен многими факторами. Основные из них: скорость истечения струи жидкости, геометрические размеры (диаметр, угол раскрытия формы струи и др.), динамический коэффициент вязкости, плотность и поверхностное натяжение жидкости, плотность и давление окружающей ороситель среды. Процесс распыления вязкой жидкости можно записать в виде критериального уравнения

$$a_{\text{ж}} = f(We, M, \rho, \mu), \quad (74)$$

где  $We = V_0^2 \rho d / \sigma$  — критерий Вебера,  $V_0$  — скорость истечения струи жидкости;  $\rho = \rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ж}}$ ;  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность струи жидкости,  $\rho_{\text{в}}$  — плотность воздуха (среды, окружающей ороитель);  $d$  — диаметр отверстия истечения,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\mu$  — динамическая вязкость жидкости;  $M = \mu^2 / (\rho_{\text{ж}} d \sigma)$

Количественные зависимости между параметрами уравнения (74) определяют экспериментально. Рассмотрение параметров показывает, что для определенного типа оросителя при прочих равных условиях степень дробления жидкости на капли зависит от скорости истечения струи жидкости через ороситель.

Зависимость между параметрами в уравнении (74) представляют в виде

$$a_n = A We l M^n \rho^\kappa,$$

где  $A$ ,  $l$ ,  $n$ ,  $\kappa$  — постоянные, определяемые при обработке опытных данных.

Распад на капли вытекающей из центробежного оросителя жидкости происходит, например, в результате деформации поверхности струи под действием возмущений, носящих сложный колебательный характер. Условия распада струи на капли в этом случае характеризуют отношение длины волны колебаний к диаметру струи. Для расчета оптимальных условий распада струи получено уравнение

$$L_*/d = \sqrt{2} \pi \sqrt{1 + \Phi \nu \bar{M}},$$

где  $L_*$  — оптимальное значение длины волны колебаний,  $d$  — диаметр отверстия истечения,  $\bar{M} = \mu^2 / (\rho_{ж} d \sigma)$ ,  $\mu$  и  $\rho_{ж}$  — динамический коэффициент вязкости и плотность струи;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\Phi$  — параметр, характеризующий вязкость жидкости (для  $M < 0,25$   $\Phi = 1$  при  $M \geq 1,25$   $\Phi = 3$ ).

Появление конусообразного факела распыленной жидкости характеризуется значением граничной скорости, которая зависит от физических свойств жидкости (плотности, динамической вязкости и поверхностного натяжения), плотности воздуха (окружающей среды) и диаметра отверстия истечения. Процесс распыления жидкости центробежными форсунками<sup>1</sup> оценивают экспериментальной зависимостью

$$266 M^{0,133} \rho^{-0,8} \ll We$$

Длину сплошной части струи рассчитывают по формуле, полученной на основе обработки экспериментальных данных:

$$\Delta/d = C We^{-0,71} \rho^{-1,21} M^{0,898},$$

где  $\Delta$  — длина сплошной части струи;  $d$  — диаметр отверстия истечения,  $C$  — параметр, определяемый экспериментально;  $We$  — критерий Вебера.

<sup>1</sup> Форсунки с цилиндрическим сопловым отверстием при отсутствии внутри них специальных устройств, возмущающих поток жидкости.

## Размер капель распыленной жидкости

В расчетах испарения, в теплотехнических расчетах и при определении динамики распыленных струй жидкости принимают средний диаметр капель. Последний зависит от вида оросителя, режима подачи воды и физико-химических свойств распыляемой жидкости и среды, в которой работает ороситель.

Средний диаметр капель жидкости, распыленной центробежной форсункой, определяют из эмпирической формулы

$$\bar{d}_k/d = 3,01 (\rho We)^{-0,266} M^{0,0733}, \quad (75)$$

где  $\bar{d}_k$  — средний диаметр капель

Уравнение (75) получено А. С. Лыньевским для форсунок, имеющих коротковолновый диапазон колебаний расхода. Для других конструкций форсунок численный коэффициент 3,01 можно заменить параметром  $E$ , который определяют экспериментально. Для расчета среднего диаметра капель струй из центробежных форсунок, создающих водяные распыленные струи, уравнение (75) после соответствующих преобразований можно привести к более простому виду.

$$\bar{d}_k = BH^{-n}, \quad (76)$$

где  $B$  и  $n$  — параметры, определяемые экспериментально,  $H$  — напор перед оросителем, м.

Экспериментальные исследования показывают, что параметр  $B$  характеризует конструкцию оросителя, а параметр  $n$  — вид кривой уравнения (76). В. И. Блинов и И. И. Новиков определили, что  $n = -1/3$ , по расчетам А. С. Лыньевского  $n = -0,532$ . Ниже приведены значения  $\bar{d}_k$  для центробежных водяных форсунок ( $d = 1 - 3$  мм), полученные экспериментально:

Напор, м . . . . .	30	60	100
$\bar{d}_k$ , мкм . . . . .	57	51	49

Для определения среднего диаметра капель струй, получаемых из эвольвентных оросителей, автором предложена эмпирическая формула

$$\bar{d}_k = Bd/\sqrt{H},$$

где  $\bar{d}_k$  — средний диаметр капель в потоке струи, мкм,  $B$  — коэффициент, определяемый экспериментально,  $d$  — диаметр выходного отверстия, мм;  $H$  — напор перед оросителем, м

## Кривые распределения размера капель

Поток распыленной жидкости состоит из большого числа капель, размеры (диаметр, поверхность или объем) которых изменяются в широких пределах.

Дисперсность дробления жидкости на капли оценивают на основании результатов экспериментальных исследований. Для определения размера (чаще всего диаметра) капель и их числа применяют скоростную кино съемку, фотометрирование, седиментометрию, улавливание капель в глицерин, масло, смесь масла с вазелином и др. В то же время цель проведения исследований — получение обобщенных уравнений для расчета среднего диаметра капель, а также характера их рассеивания.

Полученные в результате эксперимента данные анализируют с помощью математических методов, основанных на теории вероятностей. Для обработки капли группируют по размерам в вариационные (ранжированные) ряды, состоящие из интервалов  $\Delta Z$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ) в порядке их возрастания. Для каждого интервала подсчитывают относительную частоту  $f_i = n_i/n$  ( $n_i$  — число капель в интервале;  $n$  — общее число капель).

Размер интервала определяют по формуле

$$\Delta Z = (Z_{\text{макс}} - Z_{\text{мин}}) / (1 + \ln n),$$

где  $Z_{\text{макс}}$  и  $Z_{\text{мин}}$  — максимальные и минимальные значения диаметра капель

На основании величины  $\Delta Z$  определяют границы и число интервалов  $k$  в ряду наблюдений, подсчитывают варианты соответствующих интервалов и таким образом устанавливают ряды распределений (вариационные ряды).

Среднее значение величины диаметра капель определяют по формуле

$$\bar{Z} = \sum_{i=1}^k Z_i n_i / \sum_{i=1}^k n_i.$$

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma(Z)$  и коэффициент вариации  $\gamma(Z)$ , характеризующие рассеяние данных около среднего значения, определяют по формулам

$$\sigma^2(Z) = \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 n_i / n,$$
$$\gamma(Z) = \sigma(Z) / \bar{Z}.$$

Для оценки степени дисперсности капельных струй жидкости и качества распыления используют законы статистического распределения случайной величины диаметра капель, которые выражаются в дифференциальной и интегральной формах. Наиболее приемлемыми уравнениями кривых распределения капель является закон Вейбулла и уравнение логарифмически нормального распределения. Распределение капель распыленной струи жидкости по размерам, описанное с помощью закона Вейбулла, имеет вид

$$P_z \equiv P\{Z \leq Z_n\} = 1 - \exp(-Z/Z_*)^\kappa, \quad (77)$$

где  $P\{Z \leq Z_n\}$  — вероятность того, что размер капель  $Z$  не превышает детерминированной (фиксированной при любых заданных условиях) величины  $Z_n$  или равен ему;  $Z_* = \bar{Z} / \Gamma[(1+\kappa)/\kappa]$  — параметр распределения,  $\bar{Z}$  — среднее значение размера капли (математическое ожидание);  $\Gamma[(1+\kappa)/\kappa]$  — гамма-функция,  $\kappa$  — константа распределения

Дифференциальная функция (плотность распределения вероятности) представляет собой первую производную от интегральной функции (77) и имеет вид

$$p\{Z \leq Z_n\} = P'\{Z \leq Z_n\} = \frac{\kappa}{Z_*} Z^{\kappa-1} \exp(-Z/Z_*)^\kappa. \quad (78)$$

Гипотезу о распределении диаметров капель распыленной жидкости по закону Вейбулла принимают, если  $\gamma(Z) \cong 1/\kappa \cong 1$ .

Среднее значение диаметра капель (математическое ожидание) характеризует не все свойства распределения капель, а лишь одно из них. Полную характеристику распределения капель можно получить в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Для удобства статистического анализа при оценке параметров и констант распределения вероятности в предполагаемой модели процесса автором были предложены графики зависимости (рис. 85):

$$\begin{aligned} \kappa &= f_1[\sigma^2(Z)/Z^2] \\ \text{и } \kappa &= f_2(Z/Z_*) \end{aligned}$$

Логарифмически нормальная кривая асиммет-

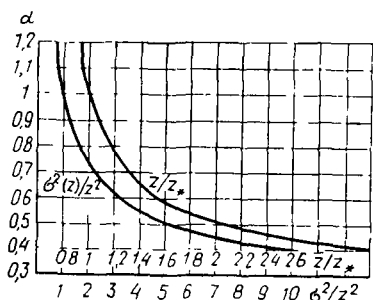


Рис. 85. Зависимости  $\alpha = f_1(\sigma^2/Z^2)$  и  $\alpha = f_2(Z/Z_*)$  для определения параметра и константы распределения размера капель распыленных струй

рична и имеет умеренную правостороннюю скошенность. Основные статистические характеристики логарифмически нормального распределения выражают следующим образом:

среднее значение

$$\bar{Z} = \int_0^{+\infty} Z q(Z) dZ = \int_0^{+\infty} 1/(\beta \sqrt{2\pi}) \exp \{ -(\ln Z - \alpha)^2 / 2\beta^2 \} dZ = e^{\alpha + \beta^2/2};$$

дисперсия

$$\sigma^2(Z) = \int_0^{+\infty} (Z - \bar{Z})^2 q^2(Z) dZ = e^{2\alpha + \beta^2} (e^{\beta^2} - 1) = \bar{Z}^2 (e^{\beta^2} - 1);$$

коэффициент вариации

$$\gamma(Z) = \sigma(Z) / \bar{Z} = \sqrt{e^{\beta^2} - 1}.$$

Гипотезу о логарифмически нормальном распределении диаметра капель выдвигают, если  $\gamma(Z) \approx 1$  или  $\sigma(Z) = 0,43\gamma(Z)$ .

Плотность логарифмически нормального распределения имеет вид

$$q(Z) = 1/(\beta Z \sqrt{2\pi}) \exp \{ -(\ln Z - \alpha)^2 / 2\beta^2 \}.$$

Интегральная функция логарифмически нормального распределения имеет вид

$$P\{Z \ll Z_n\} = \int_{-\infty}^{\ln Z} \exp \{ -(\ln Z - \alpha)^2 / 2\beta^2 \} dZ;$$

$$0 \ll Z \ll \infty; \quad \alpha = \mu(\ln Z); \quad \beta^2 = \text{var}(\ln Z).$$

Для теплотехнических расчетов охлаждающего действия распыленной струи жидкости необходимо знать поверхность капель различных диаметров. Последнюю подсчитывают по данным гранулометрического анализа с использованием методов математической статистики. Удельную поверхность капель определяют из уравнения

$$F = 6 \int_{Z_{\text{мин}}}^{Z_{\text{макс}}} (dn/dZ) Z^2 dZ \int_{Z_{\text{мин}}}^{Z_{\text{макс}}} (dn/dZ) Z^3 dZ,$$

где  $F$  — удельная поверхность капель различного диаметра,  $\text{мм}^2/\text{мм}^3$ ,  $dn/dZ$  — плотность распределения капель по размерам;  $n$  — число капель размером  $Z$ ;  $Z$  — размер капли,  $\text{мм}$ .



При использовании закона распределения Вейбулла удельную поверхность капель определяют по формуле, полученной после подстановки  $dn/dZ$  в уравнение (78) и интегрирования

$$l = 6/Z \cdot \Gamma(2-1/\kappa) / (1-1/\kappa) \quad (79)$$

С помощью формулы (79) можно рассчитать поверхность 1 г капель различного диаметра, а следовательно, и всего потока за какой-либо промежуток времени.

### Распределение жидкости в потоке струи

Рассеивание жидких струй основано на законах турбулентного перемешивания газожидкостной среды. Характер распределения плотности потока в струе изучен недостаточно, это объясняется сложностью физических процессов, сопровождающих перемешивание распыленной жидкости с окружающей средой, и трудностью построения расчетной модели. В большинстве случаев оросители устанавливают так, чтобы струя была направлена вертикально вниз. Оросители расположены, как правило, в параллельных рядах, поэтому распределение жидкости в потоке определяет расчетная площадь  $F_p$ , имеющая форму квадрата со стороной  $a$ . Фактическая площадь орошения  $F_\phi$  всегда больше защищаемой и имеет форму круга. Фактическая площадь орошения, при которой вынос жидкости за пределы расчетной площади наименьший, имеет форму круга и может быть названа эффективной  $F_\psi$ . Эффективная площадь орошения спринклера имеет форму круга с радиусом  $R_\psi = a/1,41$ . Основные расчетные формулы:

$$\left. \begin{aligned} F_\phi &= \pi R_\phi^2; \\ F_\psi &= \pi R_\psi^2 = \pi F_p / 2; \\ F_p &= a^2 = (1,41 R_\psi)^2 = 2 F_\psi / \pi. \end{aligned} \right\}$$

Эффективность орошения поверхности оценивается коэффициентом использования жидкости

$$\eta = q_p / q_\phi = F_p / F_\phi,$$

где  $q_p$  — расход воды, приходящийся на расчетную площадь, л/с;  $q_\phi$  — расход через ороситель, л/с.

В результате экспериментов установлено, что плотность орошения в пределах расчетной площади колеблется и представляет собой случайную величину, кото-

рая может быть описана нормальным законом распределения:

$$P\{I \leq I_n\} = P(I) = 1/\sigma \sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^I \exp[-(I - \bar{I})^2/(2\sigma^2)] dI,$$

где  $P\{I \leq I_n\}$  — вероятность того, что все значения переменной величины  $I$  меньше детерминированной (фиксированной при любых заданных условиях) величины  $I_n$  или равны ей.

$I$  — интенсивность орошения поверхности распыленной жидкостью, л/(м<sup>2</sup> с),  $\bar{I}$  — среднее значение плотности орошения (математическое ожидание) по поверхности распыленной жидкостью л/(м<sup>2</sup> с),  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение.

Плотность распределения случайной величины  $I$  равна:

$$P(I) = \begin{cases} 0, & \text{если } I < 0 \\ \frac{\exp[-(I - \bar{I})^2/(2\sigma^2)]}{\sigma \sqrt{2\pi} + \int_0^I \exp[-(I - \bar{I})^2/(2\sigma^2)] dI} \end{cases}$$

Распределение жидкости в потоке струн удобно оценивать коэффициентом неравномерности орошения  $K = I/\bar{I}$  или вероятностью  $P(I)$ .

Зная параметры распределения плотности орошения, можно определить ее вероятность в заданном интервале

$$P(I_1 < I < I_2) = \int_{I_1}^{I_2} P(I) dI.$$

Введя обозначение  $y = (I - \bar{I})/\sigma$ , получим  $\bar{I} = \sigma y + I$ ,  $dI = \sigma dy$ .

Пользуясь функцией Лапласа

$$\Phi(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^I e^{-y^2/2} dy,$$

получим

$$P(I_1 < I < I_2) = \Phi[(I_2 - \bar{I})/\sigma] - \Phi[(I_1 - \bar{I})/\sigma].$$

Численные значения функций Лапласа приведены в справочной литературе по математической статистике. Плотность орошения поверхности из центробежных эвольвентных и других оросителей зависит от удаления емкости расчетной точки от оси струи. А. С. Лышевским

получена эмпирическая зависимость для определения плотности орошения центробежными форсунками

$$I = I_0 \exp [-0,693 (r/r_0)^2],$$

где  $I$  — плотность орошения в расчетной точке (на расстоянии  $r$  от оси),  $I_0$  — плотность орошения на оси струи,  $r=0$ ,  $r$  — расстояние от оси струи до расчетной точки.

Плотность орошения на оси струи определяют по формуле

$$I_0 = q_0 d^2 / (8a^2 x^2),$$

где  $q_0$  — удельный поток в сечении начального участка,  $d$  — диаметр отверстия истечения,  $a$  — коэффициент, характеризующий конструкцию оросителя и определяемый экспериментально  $x$  — удаление оросителя от границы начального участка

Приняв за радиус струи расстояние от оси струи, на котором плотность потока равна  $0,5 I_0$ , получим

$$R^2_0 = 2a^2 x^2 \ln 2.$$

Зависимость плотности орошения от удаления расчетной точки от оси струи (на основании обработки экспериментальных данных) аппроксимирована формулой

$$R/x_R = f[\lg (I_0/I)],$$

где  $R$  — радиус орошения, м;  $x_R$  — удаление расчетной точки от оси струи, м,  $I_0$  и  $I$  — плотность орошения на оси струи и в расчетной точке, л/(м<sup>2</sup> с).

## Динамика движений распыленной струи

В основу методов расчета параметров движения распыленных струй положены уравнения механики падения изолированной капли аналогично движению твердой сферической частицы. Участки пути, соответствующие определенным промежуткам времени движения, принимают за траекторию струи. Распыленная струя состоит из четырех участков: начального, представляющего собой сплошной цилиндрический поток; переходного, где происходит дробление и перестройка структуры потока; основного, характеризующегося капельно-воздушной структурой потока, где скорость потока капель практически совпадает со скоростью увлекаемого ими потока воздуха; заструйного, в котором движутся отдельные капли в неподвижной среде (воздухе). Капли вылетают из оросителя со скоростью 15—30 м/с (скорость движения зависит от гидравлических параметров оросителя и напора перед ним). Вследствие сопротивления окружающей среды скорость движения капли уменьшается по мере удаления от оросителя до тех пор, пока сопротивление среды не станет равным массе капли. Впоследст-

вни она будет двигаться равномерно (при условии отсутствия скорости потока восходящих газов).

В некоторых оросителях (оросители ударного принципа действия) начальная скорость движения капли близка нулю. В таком случае для расчета траектории полета капель часто пользуются формулой Н. Е. Жуковского для падения тел в воздухе (при начальной скорости, равной нулю):

$$\ln [(1+Ku)/(1-Ku)] = 2gK\tau + A, \quad (80)$$

где  $u$  — скорость падения тела в момент времени  $\tau$ , м/с;  $\tau$  — продолжительность падения тела, с;  $K$  — коэффициент, характеризующий сопротивление среды, ее плотность и др. с/м;  $A$  — постоянная интегрирования.

Для случая свободного падения тела (при  $\tau=0$ ,  $u=0$  и  $A=0$ ) уравнение (80) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \ln [(1+Ku)/(1-Ku)] &= 2gK\tau; \\ (1+Ku)/(1-Ku) &= \exp(2gK\tau) \end{aligned} \right\}$$

Скорость падения тела за время  $\tau$

$$u_{\tau} = [1 - \exp(-2gK\tau)] / [1 + \exp(-2gK\tau)] K.$$

Путь, пройденный телом за время  $\tau$ ,

$$S_{\tau} = \{ \ln [th(Kg\tau)] \} / (K^2g).$$

Опыты показывают, что через 1—2 с после начала падения скорость капли становится равной  $u=1/K$ , и капля в дальнейшем движется равномерно. Если при  $\tau=0$  начальная скорость капли равна  $u$ , то скорость падения капли в момент  $\tau$  составит

$$u = [\exp(2gK\tau) - 1/b] / K[\exp(2gK\tau) + 1/b],$$

где  $b = (1+Ku_0)/(1-Ku_0)$ .

В этом случае путь, пройденный телом за время  $\tau$ , составит

$$S_{\tau} = 1/K \ln \{ \exp(Kg\tau) / [b \exp(Kg\tau)] \} / (1+1/b).$$

Скорость  $u=1/K$  в данном случае конечная (минимальной она будет при  $u \leq 1/K$ ). Значение  $K$  для падающей в воздухе идеальной капли

$$K = \sqrt{0,026F/mg},$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения капли;  $m$  — масса капли.

Во время пожара газообразные продукты сгорания образуют восходящие потоки. В связи с этим динамика полета капель изменяется и характер их движения отличается от того, который описывают зависимостями, выведенными из уравнения Н. Е. Жуковского. Рассмотрим

состояние идеальной капли в потоке восходящих газов. В зависимости от соотношения массы капли  $m_0$  и силы лобового сопротивления капли  $w_0$  она может падать вниз или подниматься вверх. Равновесное состояние капли (этот случай называется витанием капли), очевидно, наступит при условии

$$\left. \begin{aligned} m_0 g - w_0 &= 0, \\ m_0 g - \rho \pi d_0^2 c u^2 / 8 &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где  $m_0$  — масса капли,  $g$  — ускорение свободного падения,  $w_0$  — сила лобового сопротивления движущейся в воздухе капли;  $\rho$  — плотность потока восходящих газов,  $d_0$  — диаметр капли,  $c$  — коэффициент сопротивления движущейся капли и — скорость потока восходящих газов

Скорость витания капли определяют по формуле

$$u_0 = \sqrt{4g/3} \sqrt{d (\rho_0 - \rho) / (c \rho_0)},$$

где  $\rho_0$  — плотность жидкости капли.

Значение коэффициента  $c$  зависит от числа Рейнольдса. В первом приближении эту зависимость (при  $Re < 10^5$ ) можно выразить формулой

$$c = 24/Re + 0,67 \sqrt{c}.$$

Устабиловшуюся скорость движения идеальной капли при малых значениях числа Рейнольдса определяют из закона Стокса

$$u = 2(\rho - \rho_0) g r^2 / (9\mu),$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость струи;  $r$  — радиус капли

Проведенные исследования показывают, что капли небольшого диаметра ( $d \leq 0,15$  мм) быстро теряют начальную скорость, в результате чего большая их часть не проникает через поток восходящих газов. В практических условиях удавалось создать оросители, водяные капли из которых проникали в пламя на глубину 2—7 м. Идеализация полета отдельной капли не отражает действительную динамику движения. Движение потока распыленной жидкости представляет собой явление с более сложным взаимодействием бесконечно большого числа капель. Кроме того, сопротивление капли жидкости в потоке струи вследствие деформации ее поверхности отличается от сопротивления твердой частицы. Движение капель распыленной струи зависит в основном от размера капель, скорости их движения, угла раскрытия распыленной струи жидкости и др.

Силы, действующие на каплю, вызывают ее деформацию (поверхность капли особенно подвижна при содержании поверхностно-активных веществ). Движение

деформированных капель уже не подчиняется законам Н. Е. Жуковского и Стокса. Установившаяся скорость движения деформированной капли из-за нарушения формы лобового сопротивления и увеличения миделевого сечения капли уменьшается почти в 2 раза по сравнению со скоростью, подсчитанной по формуле Стокса.

Скорость движения деформированных капель уточняют с помощью коэффициента сопротивления деформированной капли

$$u^2 a \Psi = u_k^2 a_k \Psi_k,$$

где  $a=2$ ;  $u_k=2u$ ,  $\varphi_k=0,4$ ,  $d_k=\pi/4$ ,  $\varphi=0,2\pi$ ,  $u_k$  — установившаяся скорость идеальной капли,  $u$  — установившаяся скорость реальной (деформированной) капли

Капли в потоке струи жидкости движутся с разными скоростями. При этом они сталкиваются и образуются новые капли.

### Аэродинамические свойства потока распыленной струи

Эффект охлаждения распыленных струй жидкости в ряде случаев зависит от их аэродинамических свойств. При выходе из оросителя жидкость превращается в поток капель, движущихся в воздушной струе. Воздушный поток влияет на скорость капель и движение всей струи. Общий напор струи определяют по ее реакции (силе, действующей в направлении, противоположном направлению потока). Скорость воздушного потока, увлекаемого водяными каплями диаметром 1 мм, становится постоянной на расстоянии 1,8 мм от оросителя. На этом расстоянии напор крупнокапельных струй (средний размер капель 1,5—3,5 мм) превращается в кинетическую энергию воздушного потока только наполовину. Аэродинамические свойства потока распыленной струи характеризуются реакцией струи. Реакция распыленных струй определялась автором экспериментально. Полученные данные (приведены ниже) позволяют обоснованно выбирать оросители в зависимости от характера сил, способных отклонять распыленные струи (поток продуктов горения, ветер и др.).

Средний напор потока распыленной струи определяют выражением  $R_c/F_c$  ( $R_c$  — реакция струи,  $F_c$  — площадь поперечного сечения струи в плоскости). Реакции струй оросителей, используемых в установках

противопожарной защиты, определены автором экспериментально. Ниже приведены реакции струй (кН) (при давлении перед оросителем 500 кПа) и различном расходе воды (л/с):

	Расход воды	Реакция струи
Центробежный ороситель . . . . .	0,5	12,5
»       »       . . . . .	1,2	35
»       »       . . . . .	2,2	55
»       »       . . . . .	3	77
Ороситель с эвольвентной камерой	3	50
Тангенциальный ороситель . . . . .	4	34

Если предположить, что напор водяной струи полностью преобразуется в движение увлеченного потока воздуха, то среднюю скорость движения воздуха определяют из уравнения

$$\rho_a v_a^2 = R_c / F_c = a_c q \sqrt{H} / F_c,$$

где  $v_a$  — скорость движения воздуха, увлекаемого каплями распыленной струи,  $\rho_a$  — плотность окружающего воздуха,  $a_c$  — константа, зависящая от типа орошителя,  $H$  — напор перед оросителем,  $q$  — расход воды,  $R_c$  — реакция струи,  $F_c$  — площадь поперечного сечения струи.

Опыты показывают, что характер распределения скорости увлеченного воздуха в струе мало зависит от распределения расхода воды внутри струи.

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ, ТРЕБУЕМОГО ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ

Современные промышленные предприятия оснащены оборудованием для создания противопожарной безопасности и охраны труда обслуживающего персонала.

Противопожарное водоснабжение играет решающую роль в решении задач противопожарной защиты предприятия и охраны труда. Системы противопожарного водоснабжения предназначены для подачи воды в передвижную противопожарную технику и стационарное оборудование, предназначенное для решения конкретных задач обеспечения пожарной безопасности промышленного предприятия. Главным направлением развития систем противопожарной защиты предприятий является предупреждение опасных последствий возникновения загораний. Для этой цели предусматривают строительство таких систем противопожарного водоснабжения, кото-

рые бесперебойно подают требуемое количество воды в передвижную пожарную технику, в стационарные установки пожаротушения, для обеспечения пожарной безопасности технологических агрегатов, сохранения прочности строительных конструкций зданий и сооружений во время пожара и т. д. Расчет параметров водопроводных сооружений системы противопожарного водоснабжения промышленного предприятия начинают с определения требуемого количества воды для обеспечения пожарной безопасности наиболее опасных в пожарном отношении объектов промышленного предприятия. Интенсивность подачи воды для оборудования системы противопожарной защиты зависит от требований, обуславливающих уровень пожарной безопасности людей, технологического оборудования и строительных конструкций защищаемого оборудованием объекта (здания, сооружения и т. п.).

Количество воды, требуемое для обеспечения пожарной безопасности, определяют в зависимости от воздействующих на защищаемый объект факторов пожара: конвекции, излучения и теплопроводности, характеризующих закономерности распространения пожара и его воздействие на защищаемый объект.

### **Интенсивность подачи воды для тушения пожаров**

Экспериментальные исследования удельного расхода воды для тушения пожаров сопряжены с известными трудностями, а иногда невозможны по техническим или экономическим соображениям. В связи с этим важную роль играют методы аналитического расчета интенсивности подачи воды для тушения пожаров. Интенсивность подачи воды для тушения пожаров твердых сгораемых материалов рассчитывают по испарительной и охлаждающей способности воды, вводимой в сферу горения материалов.

Тепловой баланс процесса горения твердых сгораемых материалов при пожаре (до начала тушения) представляют следующим уравнением

$$Q_p + Q_r + Q_v = \Sigma Q_n + Q_p, \quad (81)$$

где  $Q_p$  — теплота сгорания материалов;  $Q_r$  — энтальпия горячего материала,  $Q_v$  — энтальпия воздуха, поступающего в зону горения,  $\Sigma Q_n$  — суммарные потери тепла, выделяющегося во время пожара,  $Q_p$  — тепло, требуемое для развития пожара (для создания условий горения материала, еще участвующего в процессе горения).



Сведения о теплоте сгорания материалов имеются в справочной литературе, при отсутствии справочных данных ее определяют экспериментально или расчетом.

Энтальпию горючего материала определяют по формуле

$$Q_r = c_r t_r,$$

где  $c_r$  — удельная теплоемкость сгораемого материала МДж (кг · К),  $t_r$  — температура сгораемого материала перед пожаром, К.

Энтальпию воздуха, поступающего в зону горения, определяют по формуле

$$Q_{п} = \alpha_v v_v c_v t_v,$$

где  $\alpha_v$  — коэффициент избытка воздуха,  $v_v$  — теоретический расход воздуха, поступающего в зону горения, м<sup>3</sup>/кг,  $c_v$  — объемная теплоемкость воздуха, МДж/(м<sup>3</sup> · К),  $t_v$  — температура воздуха до пожара К

Определение суммарных потерь тепла, образующегося во время пожара, представляет сложную задачу. При возникновении пожаров в помещениях выделяющееся тепло частично нагревает воздух внутри помещения, частично уносится наружу с продуктами сгорания и частично аккумулируется ограждениями и оборудованием, расположенным в помещении. Анализ выполненных работ по исследованию процесса распределения тепла при пожарах показывает, что для приближенных расчетов интенсивности подачи воды при тушении пожара  $\Sigma Q_{п} = 0,8 Q_{рп}$ . Таким образом, удельный расход тепла для развития пожара можно определить по формуле

$$Q^*_{р} = m^* (0,2 Q_{рп} + Q_r + Q_{п}),$$

где  $Q^*_{р}$  — удельный расход тепла для развития пожара, МВт/м<sup>2</sup>,  $m^*$  — приведенная (отнесенная к единице площади пожара) удельная скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup> · с),  $Q_{рп}$ ,  $Q_r$  и  $Q_{п}$  — обозначения см формулу (81)

Для прекращения процесса горения количество тепла для развития пожара уменьшают, вводя в очаг горения капельные водяные струи. Проникая в обуглившуюся поверхность, вода постепенно охлаждает ее до температуры, при которой горение прекращается. На пути к охлаждаемой поверхности водяные капли встречают поток нагретых газов и пламя. В результате этого часть водяных капель нагревается и достигает орошаемой поверхности уже нагретой до определенной температуры, а другая их часть испаряется в пламени и не достигает заданной цели. Таким образом, эффект использования воды при тушении пожара зависит от ее проникающей способности, условий смачивания (охлаждения) нагретого слоя поверхности горящих материалов и продолжи-

тельности пребывания водяных капель в области горения.

Уравнение теплового баланса при тушении пожара капельными водяными струями в элементарном виде можно представить следующим образом:

$$Q_{\text{н}} + Q_{\text{ох}} \geq Q_{\text{р}},$$

где  $Q_{\text{н}}$  — количество тепла, отбираемое в процессе испарения воды подаваемой в очаг горения,  $Q_{\text{ох}}$  — количество тепла, отбираемое водой при ее нагревании в результате контакта с горячей поверхностью,  $Q_{\text{р}}$  — количество тепла для развития пожара

Однако не вся вода используется для тушения пожара, лишь часть ее испаряется и нагревается, а другая часть не участвует в процессе и вытекает из зоны горения. Количество тепла, отбираемое при тушении пожара капельными водяными струями, можно выразить формулой

$$Q^*_{\text{р}} \leq \Psi \{ [c_{\text{р}} + c(t_{\text{н}} - t_0)] \varphi + c[(1 - \varphi)(t_{\text{н}} - t_0)] \},$$

где  $\varphi$  — коэффициент использования воды в процессе тушения пожара (отношение количества воды, участвующей в процессе тушения, к общему количеству воды),  $\varphi$  — доля испарившейся воды, участвующей в процессе тушения,  $c_{\text{р}}$  — удельная теплота испарения воды, МДж/кг,  $c$  — удельная теплоемкость нагретой воды, МДж/(кг · К),  $t_{\text{н}}$  — температура испарения воды К,  $t_{\text{н}}$  — температура воды, вытекающей из зоны горения, К,  $t_0$  — температура воды подаваемой в очаг пожара, К

На основании экспериментальных исследований для большинства твердых сгораемых материалов в ориентировочных расчетах могут быть приняты следующие значения:  $\psi = 0,6$ ,  $\varphi = 0,3$ ;  $t_{\text{н}} = 40^\circ\text{C}$ . Исходя из этих соображений, можно получить формулу для определения удельного расхода воды при тушении твердых сгораемых материалов:

$$I \geq \frac{m^* (0,2 Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{Г}} + Q_{\text{В}})}{0,18 [c_{\text{р}} + c(t_{\text{н}} - t_0)] + 0,4 \cdot c(t_{\text{н}} - t_0)},$$

где  $I$  — удельный расход воды для тушения твердых сгораемых материалов, л/(м<sup>2</sup> · с),  $m^*$  — приведенная удельная скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup> · с),  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  — теплота сгорания материалов, МДж/кг,  $Q_{\text{Г}}$  — энтальпия горящего материала, МДж/кг,  $Q_{\text{В}}$  — энтальпия воздуха, МДж/кг;  $c_{\text{р}}$  — удельная теплота испарения воды, МДж/кг,  $c$  — удельная теплоемкость воды, МДж/кг,  $t_{\text{н}}$  — температура испарения воды К,  $t_0$  — температура воды, подаваемой в очаг горения,  $t_{\text{н}}$  — температура воды, вытекающей из зоны горения, К

Приведенный метод расчета дает результаты, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными. Значительную трудность в предлагаемом методе представил расчет параметров, характеризующих фазы процесса пожара и условия тепломассообмена, так

как на фазы развития пожара влияют факторы, которые трудно учесть в расчете: размещение сгораемых материалов в помещении, размеры и расположение источников воспламенения, формы и размеры помещения, площадь поверхности горения. Предложенная модель расчета может быть положена в основу других более совершенных расчетных моделей, учитывающих наиболее характерные факторы развития пожара в каждом конкретном случае. Наиболее целесообразно использовать эту модель для анализа экспериментальных данных. Это дает возможность проследить зависимость расчетных значений интенсивности подачи воды при тушении пожаров от наиболее важных параметров. Основное преимущество экспериментальной проверки состоит в том, что в этом случае можно устранить источники погрешностей, связанных с недостаточностью информации при составлении аналитической модели расчета. Удельные расходы воды для тушения пожаров стационарными средствами определяют экспериментально на специальных стендах, позволяющих изменять и замерять интенсивность подачи воды при тушении пожара. Во время эксперимента замеряют и продолжительность подачи воды, которая характеризуется временем окончания процесса тушения пожара. Изменяя интенсивность подачи воды, но сохраняя условия процесса развития пожара, получают соответствующие им продолжительности тушения, на основании которых строят кривые зависимости интенсивности подачи воды от продолжительности тушения пожара.

Результаты проведенных экспериментов аппроксимируют формулой

$$I = I_* + \frac{\nu}{\tau - \tau_*} \quad (I_{\text{макс}} > I \geq I_*), \quad (82)$$

где  $I$  — удельный расход воды для тушения пожара, л/(м<sup>2</sup>·с),  $I_*$  — критическое значение удельного расхода воды, при котором еще возможен эффект тушения, л/(м<sup>2</sup>·с),  $\nu$  — параметр свойств сгораемых материалов и условий подачи воды в очаг горения, л·м<sup>2</sup>,  $\tau$  — продолжительность подачи воды при тушении пожара, с,  $\tau_*$  — критическая продолжительность подачи воды, когда эффект тушения пожара практически не изменяется с увеличением расхода воды, с.

Значения удельного расхода воды для тушения пожара измеряются в определенном диапазоне. При этом продолжительность подачи воды уменьшается по мере увеличения удельного расхода.

Удельные расходы воды при тушении пожаров раз-

личных горючих материалов спринклерными установками приведены ниже.

	Удельный расход воды, л (м <sup>2</sup> ·с)
Автомобили в гараже . . . . .	0,06
Древесина (в штабеле высотой до 1 м) . . . . .	0,61—0,082
Триакетатная киноплёнка (в стеллаже) . . . . .	0,08
Текстолит, карболит, бумага (в штабеле высотой до 1 м) . . . . .	0,1
Древесина для изготовления тары . . . . .	0,11—0,14
Резина, синтетический и натуральный каучук и изделия из них (в штабеле высотой до 1 м) . . . . .	0,14
Продукция в картонных коробках (штабеля высотой до 6 м) . . . . .	0,15—0,2
Текстильные изделия (в упаковке) . . . . .	0,18
Стеллажные склады с бочками . . . . .	0,145—0,24
Древесина в вите реек . . . . .	0,27—0,34
Автомобильные покрышки (в штабелях складах высотой 1,8—4,3 м) . . . . .	0,27—0,55
Полистирол (в штабелях складах высотой 2,4—6,4 м) . . . . .	0,1—0,4

Из приведенных данных видно, что даже для ограниченного ряда материалов удельный расход воды для тушения пожара изменяется в широком диапазоне. Это объясняется тем, что одни и те же горючие материалы имеют различную интенсивность тепловыделения, которую определяют вид материалов и плотность их упаковки. Удельный расход воды для тушения пожаров зависит не только от характеристики противопожарной опасности материалов, но и высоты штабеля.

Интенсивность тепловыделения материалов является наиболее весомым фактором при определении расхода воды. Ниже приведены величины удельного расхода воды в зависимости от значений интенсивности тепловыделения

Интенсивность тепловыделения, МВт/м <sup>2</sup>	0,14	0,29	0,58	1,06
Удельный расход воды, л (м <sup>2</sup> ·с) . . . . .	0,05	0,1	2	0,4

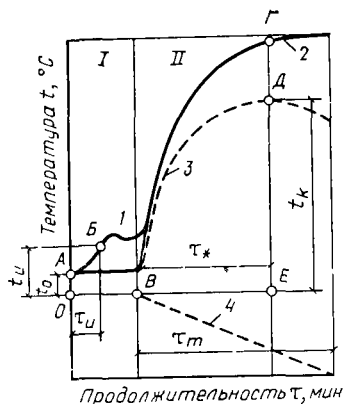
При определении потребности в воде в зависимости от интенсивности тепловыделения необходимо знать основные параметры, характеризующие процесс тепловыделения при пожаре. К таким параметрам в первую очередь относятся удельная теплота сгорания (МДж/кг)

и удельная скорость выгорания [кг/(м<sup>2</sup>·с)] Если значения первого параметра можно найти в справочной литературе или определить расчетом, то вторую величину находят значительно труднее. Дело в том, что удельная скорость выгорания в значительно большей степени зависит от характера расположения сгораемых материалов, плотности их уаковки, размера развитой поверхности возможного горения, условий вентиляции (притока, достаточного для горения воздуха) и т. п. В связи с этим удельную скорость выгорания, как правило, определяют экспериментально в установках, максимально приближающих условия эксперимента к реальной обстановке на пожаре. Важно отметить, что существуют два понятия скорости выгорания для твердых сгораемых материалов: действительная скорость выгорания, отнесенная к единице поверхности горения, и приведенная скорость выгорания, отнесенная к единице площади пола, на котором возник пожар. Таким образом, по мере увеличения высоты стеллажа приведенная скорость выгорания (при условии постоянства площади проекции горения) материала, обладающего постоянными физико-химическими свойствами, будет увеличиваться прямо пропорционально высоте стеллажа. Следовательно, и количество воды, необходимой для успешного тушения пожара в таких условиях, будет возрастать по мере увеличения плотности загрузки материалов. Это положение подтверждают и экспериментальные исследования.

### **Интенсивность подачи воды для тушения пожаров в зданиях из металлических конструкций**

Подачу воды (пены) определяют в зависимости от критических (допустимых по условиям пожарной безопасности) факторов пожара, поэтому задачи по определению режима работы системы водоснабжения решают в зависимости от требований, характеризующих допустимый уровень теплового воздействия пожара на защищаемый системой объект. Требуемый уровень пожарной безопасности объекта определяют на основании закономерностей продолжительности его нагревания до критической температуры<sup>1</sup>. Система противопожарного водоснаб-

<sup>1</sup> Температура, при которой возможна авария технологического аппарата, потеря несущей способности строительной конструкции и т. п.



Продолжительность  $\tau$ , мин

Рис 86 Характер изменения температур в помещении, оборудованном системой пожаротушения

I — область развивающегося пожара, II — область разившегося пожара  
 1 — кривая «температура — время» для развивающегося пожара  
 2 — кривая «температура — время» для развившегося пожара (система пожаротушения отсутствует).  
 3 — температура в помещении при работе системы, 4 — уменьшеннс температуры в помещении в результате воздействия системы на пожар.  
 А — начало пожара Б — включение пожарного извещателя  
 В — включение системы тушения Г — температура в помещении (система включена), Д — температура в помещении; Е — окончание тушения пожара

жения должна своевременно (до достижения критических температур) подать такое количество воды, при котором невозможно опасное повышение температур, а следовательно, и аварийное состояние защищаемого системой объекта. Поэтому при определении параметров системы водоснабжения важно знать время нагревания конструкций и оборудования до критической температуры или их огнестойкость. На основе метода расчета фактических пределов огнестойкости необходимо выявить картину нагрева конструкции и характер изменения ее несущей способности. Принципиальное значение в решении этой задачи имеет вопрос установления температурного режима фактического пожара. Другим препятствием на пути решения задачи явилось уточнение ряда параметров существующего алгоритма расчета.

Математическое описание задачи и разработанный автором алгоритм ее решения изложены ниже

После начала тушения пожара воздух и находящиеся в помещении конструкции нагреваются менее интенсивно, чем во время пожара, характеризующегося стандартным температурным режимом (рис. 86, кривая 2). При подаче воды в очаг горения уменьшается темп роста температуры (кривая 4). Характер изменения температуры во время пожара при работе системы пожаротушения выражается кривой 3. На рис. 86 видно, что температура в помещении во время тушения пожара снижается по сравнению со стандартным температурным режимом. Снижение температуры (кривая 4) при тушении пожара (при  $v_t = \text{const}$ ) зависит от скорости сни-

жения температуры в помещении при тушении  $v_t$  и продолжительности тушения  $\tau_t$ . Изменение температуры в помещении при тушении пожара выражается следующим образом:

$$t = 345\psi \lg(8\tau + 1) - v_t \tau. \quad (83)$$

Кривая 3, построенная по уравнению (83), показывает, что температура достигает максимального значения в точке  $D$  за промежуток времени  $\tau_*$ , который не соответствует окончанию процесса тушения  $\tau_t$ . Максимальная температура, которая представляет практический интерес, будет при значении  $\tau_*$ , когда первая производная температуры по времени обратится в нуль ( $dt/d\tau = 0$ ).

При дифференцировании уравнения (83) получим:

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} [345\psi(8\tau + 1) - v_t \tau] = [345\psi/(8\tau + 1)] 8 \lg e - v_t = 0; \\ 1200\psi/(8\tau + 1) - v_t = 0, \\ \tau_* = (1200\psi - v_t)/(8v_t). \end{cases} \quad (84)$$

Максимальную температуру получим, подставив выражение (84) в уравнение (83):

$$t_* = 345\psi \lg(1200\psi/v_t) - (1200\psi - v_t)/8. \quad (85)$$

Из уравнения (85) следует, что максимальная температура в помещении зависит от скорости снижения температуры:

$$v_t = 1200\psi/(8\tau_* + 1). \quad (86)$$

Время достижения максимальной температуры установлено экспериментально и равно  $0,33 \tau_t$ .

Количественную оценку процесса прогресса (до критической температуры) выполним на основе конечно-разностного метода расчета. Температуру конструкции  $t_{ст}^i$  в интервале  $i$  определили из уравнений тепловых балансов, учитывающих условия нестационарности теплоотдачи и характер нелинейности теплопередачи:

$$t_{ст}^i = \alpha^i (t_{в}^i - t_{ст}^{i-1}) \Delta\tau / [(c_{ст} + D_{ст} t_{ст} \tau) \rho_{ст} \delta_{ст}] + t_{ст}^{i-1},$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи при пожаре;  $t_{в}$  — среднее значение температуры среды (закон изменения  $t_{в}$  принят по уравнению (83);  $t_{ст}$  — температура конструкции,  $\Delta\tau$  — расчетный интервал времени;  $c_{ст}$  и  $\rho_{ст}$  — удельная теплоемкость и плотность стали,  $D_{ст}$  — коэффициент, учитывающий повышение теплоемкости стали с ростом температуры,  $t_{ст}$  — начальная температура конструкции,  $\tau$  — продолжительность нагрева  $\delta_{ст}$  — расчетная толщина конструкции

Задача по определению показателей системы водоподдачи сводится к нахождению такой величины  $v_t$ :

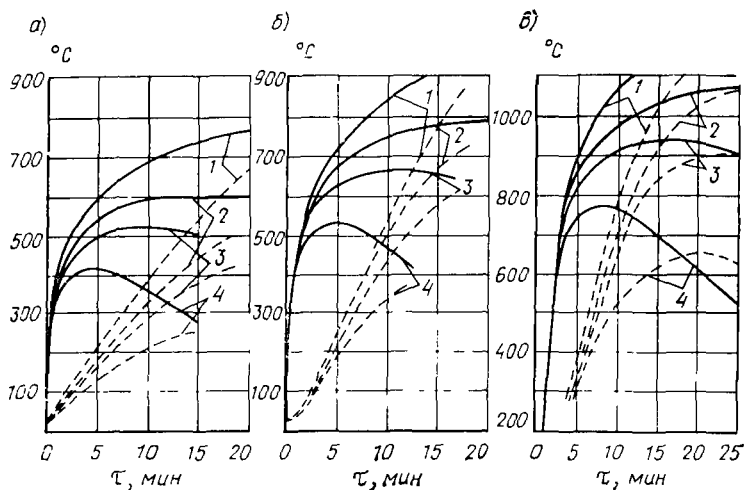


Рис. 87. Кривые «температура — время» Сплошная линия — температура в помещении; пунктирная линия — температура стальной конструкции ( $\delta = 10$  мм)  
 а — стандартный пожар, б — нестандартный пожар при  $\psi = 1,3$  в — нестандартный пожар при  $\psi = 1,6$ , 1 — установка АТП отсутствует  $V_t = 0$ , 2 —  $V_t = 8$  °С/мин; 3 —  $V_t = 15$  °С/мин, 4 —  $V_t = 30$  °С/мин

[см. формулы (83) — (86)], при которой температура в конструкциях не будет превышать критическую. Исследования выполнены для ряда вариантов Основные значения исходных данных для расчета приведены ниже:  
 $\rho_{ст} = 7800$ ;  $c_{ст} = 4,4 \cdot 10^{-4}$ ;  $D_{ст} = 0,000114$ ;  $A_t = 0,1$  мин,  $\delta_{ст} = 0,003 - 0,03$  мм,  $\psi = \tau/t_0 = 1; 1,3, 1,6$ ;  $v_t = 0; 8, 15, 30$  и  $60$  °С/мин.

Результаты расчета представлены в виде графиков (рис. 87), по которым определяют продолжительность прогрева до критической температуры. На основании этих данных определены значения требуемой скорости снижения температуры  $v_t$  (°С/мин) в помещении при тушении пожаров в зданиях, имеющих строительные конструкции с различной огнестойкостью ( $\tau$ ) и для различных коэффициентов  $\psi$ :

Огнестойкость	Коэффициент $\psi$		
	1	1,3	1,6
0,1	15	37,5	55
0,2	12,5	27,5	45
0,3	10	20	35
0,4	7,5	15	25



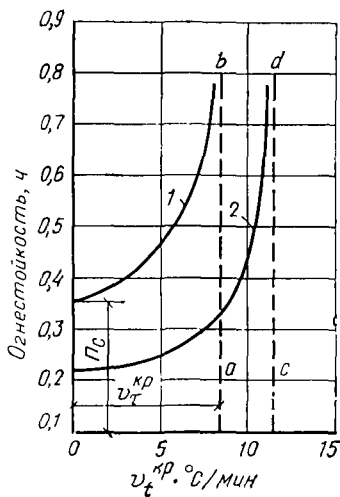
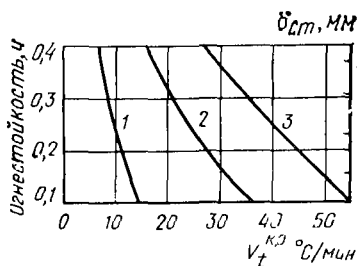
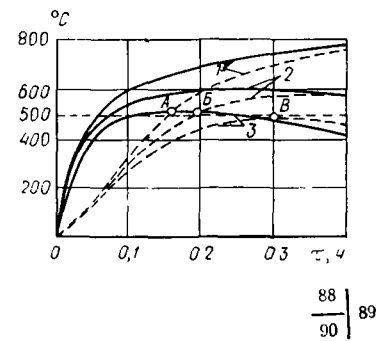


Рис 88. Изменение температуры в помещении (сплошные линии) и конструкции (пунктирные линии) 1 — при  $V_t = 0$  2 — при  $V_t = 8 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$ , 3 — при  $V_t = 15 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$

Рис 89. Пределы огнестойкости стальных конструкций в зависимости от скорости  $V_t$  и условия, характеризующие беспредельную огнестойкость конструкций

1 —  $P_c = 0.37 \text{ ч}$ ,  $\delta = 20 \text{ мм}$ ; 2 —  $P_c = 0.23 \text{ ч}$ ,  $\delta = 10 \text{ мм}$

Рис 90. График для определения критической скорости  $V_t$ , характеризующей пожарную безопасность стальных конструкций при пожаре

1 —  $\psi = 1$  («стандартный» температурный режим); 2 —  $\psi = 1.3$  3 —  $\psi = 1.6$

Полученные данные можно использовать для оценки выходного эффекта автоматизированной системы противопожарного водоснабжения, предназначенной для противопожарной защиты зданий из легких металлических конструкций. Анализ результатов расчета показал, что режим работы системы (интенсивность и продолжительность подачи воды) определяет требуемую огнестойкость конструкции защищаемого ею здания. В частности, огнестойкость стальной конструкции (рис. 88) при стандартном пожаре ( $\psi = 1$  и  $v_t = 0$ ) составляет 0,16 ч (точка А), при  $v_t = 8 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$  огнестойкость этой конст-

рукции увеличивается до 0,20 ч (точка Б), при  $v_t = 15^\circ\text{C}/\text{мин}$  максимальное значение температуры в конструкции (точка В) не достигает критического значения ( $500^\circ\text{C}$ ) и составляет всего  $480^\circ\text{C}$  (точка В), следовательно огнестойкость конструкции в этом случае становится беспределельной.

На ЭВМ вычислены фактические пределы огнестойкости стальных конструкций при различных значениях  $v_t$  и  $\psi$  ( $v_t$  составляла 0; 8; 15; 30 и  $45^\circ\text{C}/\text{мин}$  при  $\psi$ , равных 1; 1,3 и 1,6). Для иллюстрации на рис. 89 приведены результаты обработки вычислений фактических пределов огнестойкости стальных конструкций в зависимости от скорости  $v_t$ . С увеличением  $v_t$  фактические пределы огнестойкости увеличиваются и при определенных значениях, соответствующих  $\tau_i^k$ , обращаются в бесконечность. Касательная  $ab$  к кривой 1 характеризует граничные условия противопожарной безопасности стальной конструкции ( $P_c = 0,37$  ч;  $\delta = 20$  мм), а касательная  $cd$  к кривой 2 — конструкции ( $P_c = 0,23$  ч;  $\delta = 10$  мм) в здании, оборудованном автоматизированной системой водоснабжения, обеспечивающей скорость снижения температуры  $v_t^{kp} = 7,9^\circ\text{C}/\text{мин}$  и  $11,3^\circ\text{C}/\text{мин}$  соответственно.

Результаты вычисления представлены на рис. 90 в виде графика  $v_t^{kp} = f(P_c)$ , с помощью которого определены значения критической скорости  $v_t^{kp}$  для стальных конструкций различной огнестойкости (расчетной толщины) при соответствующих температурных режимах пожара. С помощью этого графика можно решать обратную задачу, т. е. по заданным значениям  $v_t^{kp}$  и  $\psi$  определить требуемую огнестойкость (расчетная толщина) строительных конструкций, отвечающую условиям противопожарной безопасности. Значение  $v_t^{kp}$  не дает представления о параметрах водопроводных сооружений автоматизированной системы водоснабжения. В связи с этим целесообразна зависимость для расчета интенсивности подачи воды

$$I \geq a + c/[450\psi/v_t^{kp} - (b + 0,375)],$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — параметры, характеризующие процесс тушения

Полученные данные позволяют количественно оценить влияние процесса водообеспечения на огнестойкость строительных конструкций, а также определить параметры системы водопроводных сооружений.

## Интенсивность подачи воды для тушения пожаров горючих жидкостей

Основным параметром, характеризующим эффективность тушения пожаров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, является интенсивность подачи пены в очаг горения. Для того чтобы успешно потушить пламя горючей жидкости, пена должна покрыть всю горящую поверхность слоем определенной толщины  $\delta$ . На образование этого слоя расходуется только часть пены, подаваемой в очаг горения, а другая ее часть разрушается при контакте с пламенем и нагретой горючей жидкостью. Происходящие при этом изменения высоты слоя пены во времени  $\tau$  выражаются уравнением

$$d\delta = (\varphi IK - V_p) d\tau, \quad (87)$$

где  $\varphi$  — коэффициент, учитывающий разрушение пены в пламени,  $I$  — интенсивность подачи пенообразующего раствора,  $V_p = d\delta/ds$  — скорость разрушения пены,  $K$  и  $s$  — кратность и продолжительность разрушения пены

Из уравнения (87) после его интегрирования получена зависимость

$$\tau_r = s \ln \left( \frac{1}{1 - V_p/(\varphi IK)} \right) = -s \ln [1 - 1/(\varphi Ks)]. \quad (88)$$

Для определенных условий подачи пены в очаг горения параметры  $\delta$ ,  $s$  и  $K$  являются постоянными для того или иного вида аппаратуры<sup>1</sup>, а параметр  $\varphi$  является постоянным для фиксированного положения аппаратуры относительно оси пламени<sup>2</sup>. При фиксированных параметрах  $\delta$ ,  $s$ ,  $K$ ,  $\varphi$  продолжительность тушения пожара зависит лишь от интенсивности подачи пены. Эффект тушения пожара пеной при фиксированных параметрах  $\delta$ ,  $s$ ,  $K$  и  $\varphi$  характеризует критическая интенсивность ее подачи  $I_* = \delta/(\varphi Ks)$ . Выражение взаимосвязи указанных параметров аналитически представляет большие трудности, поэтому часто их определяют экспериментально. Так, на основе экспериментальных исследований И. И. Петров установил оптимальную кратность пены (120—150) для тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах. Для тушения пожаров горючих жидкостей, разлитых в помещении, автором установлена оптимальная кратность пены  $K_{\text{опт}} = 50$ , а для успешной про-

<sup>1</sup> Эти параметры характеризуют качество пены, получаемой из аппаратуры.

<sup>2</sup> Этот параметр характеризует условия подачи пены в очаг горения.

тивопожарной защиты технологических аппаратов —  $K_{\text{опт}}=8$ . Пенная аппаратура для автоматических установок пожаротушения в промышленных зданиях и технологических установках пожароопасных производств, в которых перерабатывают горючие и легковоспламеняющиеся жидкости, должна подавать пену оптимальной кратности. Уравнение (88) не имеет экстремума, а поэтому не может быть использовано для определения минимального значения интенсивности подачи. Значение нормативной интенсивности подачи пены рекомендуется принимать равным  $2,3 I_*$ . Таким образом, для тушения пламени бензинов в резервуарах интенсивность подачи пены должна быть  $0,08 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , а при тушении пламени нефтепродуктов —  $0,05 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Исследования показали, что приведенный метод расчета  $I$  дает удовлетворительные результаты, согласующиеся с данными, которые определены экспериментально на специальных стендах. В процессе экспериментов измеряли расход водного раствора пенообразователя, который пересчитали в интенсивность подачи (удельный расход) для тушения пожара, исходя из условия создания требуемой толщины или объема пены, равной  $q = W/(\tau_{\text{т}} K \kappa)$ , где  $\tau_{\text{т}}$  — продолжительность тушения,  $W$  — объем пены,  $K$  — кратность пены,  $\kappa$  — коэффициент разрушения (использования пены). Коэффициент использования пены для тушения пожаров различных горючих жидкостей выражался отношением фактического слоя пены к расчетному. Ниже приведены значения коэффициента использования пены ( $\kappa$ ), полученной на основе 4 %-ного водного раствора пенообразователя ПО-1, и удельного расхода (по раствору) [ $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ] при тушении экстракционного бензина.

Удельный расход . . . . .	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$\kappa$ . . . . .	0,4	0,42	0,45	0,5	0,55

Исходя из предварительной оценки расхода, на стенд устанавливается такое число генераторов пены, которое обеспечило бы необходимый расход при номинальном напоре. Интенсивность подачи изменяли выключением подачи раствора в отдельные генераторы пены. Во время опытов измеряли продолжительность подачи пены (до полного подавления пламени).

Результаты проведенных экспериментов аппроксимируются эмпирической формулой (82), в которой величи-

на  $I_*$  представляет собой минимально допустимое значение интенсивности подачи водного раствора пенообразователя, при которой еще возможен эффект тушения. Параметр  $\nu$  характеризует свойства горючих материалов и условия подачи средств тушения. Параметр  $\tau_*$  характеризует критическое значение продолжительности подачи, когда эффект тушения пожара практически не изменяется с увеличением удельного расхода воды. Для исключения возможных ошибок при определении параметров в формуле число опытов следует уточнять в зависимости от допустимого размера относительной ошибки значений  $I_0$ ,  $\tau_0$  и  $\nu$ . Показатель достоверности при обработке экспериментальных данных обычно принимают равным 2, что соответствует погрешности результата, не превышающей 5%. В результате проведенных исследований определены параметры ( $I_* = 0,08$ ;  $\nu = 6$ ;  $\tau_* = 30$ ) в формуле (82) для расчета удельного расхода 4%-ного водного раствора пенообразователя ПО-1 (для  $0,1 \leq I \leq 0,7$ ) при тушении пламени легковоспламеняющихся жидкостей. Ниже приведены результаты исследований<sup>1</sup> по определению удельных расходов  $I$  [л/(м<sup>2</sup>·с)] и удельных объемов  $W_0$  (л/м<sup>2</sup>) раствора пенообразователя для тушения некоторых легковоспламеняющихся жидкостей.

	$I$	$W_0$
Экстракционный бензин . . . . .	0,16—0,7	19—9
Бензол . . . . .	0,65	21
Толуол . . . . .	0,67—0,74	30—40
Циклогексан . . . . .	0,5—0,65	15—25
Масса СКД . . . . .	0,53	22—25
» СКЭП . . . . .	0,148—0,615	19—26

Ниже приведены результаты исследований<sup>1</sup> зависимости продолжительности тушения (с) от удельного расхода раствора пенообразователя  $I$  [л/(м<sup>2</sup>·с)] при тушении пламени легковоспламеняющихся жидкостей (бензин, бензол, толуол, циклогексан).

$I$	0,68—0,28	0,2—0,165	0,158—0,137	0,126—0,115	0,102—0,1
$\tau$	40—60	80—100	120—140	160—200	300—400

<sup>1</sup> Исследования выполнены под научным руководством и при непосредственном участии автора на полигонной установке в условиях, приближенных к реальным пожарам. Воздушно-механическая пена получена из генераторов струйного типа при давлении 20—40 м и подаче 4—5%-ного водного раствора пенообразователя ПО-1.

Результаты исследований по определению  $\tau$  (с) пламени горючих жидкостей и  $I$  [л/(м<sup>2</sup>·с)]:

	$I$	$\tau$
Лак М4-52 . . . . .	0,244—0,138	23—60
Смола МС-080 . . . . .	0,395—0,138	20—30
Лак 4с . . . . .	0,202—0,13	30—40'
» ПФ-(60) . . . . .	0,324—0,125	26—54
Лак ПЕ-246 . . . . .	0,324—0,138	25—45
Уайт-спирит . . . . .	0,603—0,181	112—340

Результаты экспериментов положены в основу многочисленных рекомендаций и норм по проектированию установок пенного пожаротушения.

### Интенсивность подачи воды для систем водоорошения

Эффект водоорошения строительных конструкций (металлических ферм, перекрытий, колонн и др.) резервуаров с нефтепродуктами и сжиженными горючими газами, а также технологического оборудования (ректификационных колонн, реакторов, полимеризаторов, трансформаторов и др.) зависит от расхода воды, качества ее диспергирования и условий теплообмена между потоком распыленной воды и орошаемой ею поверхностью. В связи с этим при решении вопросов водообеспечения систем орошения, предотвращающих опасность возникновения критических условий в нагреваемом при пожаре объекте, учитывали факторы воздействия огня на защищаемый объект. Аналитические модели (система дифференциальных уравнений, описывающих процесс восприятия тепла капельными водяными струями) могут быть использованы лишь для выявления основных факторов, характеризующих эффект водяного орошения. В результате исследования процесса водоохлаждения было установлено, что на орошаемую поверхность попадет только часть подаваемой оросителем воды, которая за время движения в среде пожара нагревается до определенной температуры. Поэтому соотношения, определяющие количество попадающей на нагретую поверхность воды, долю испаряющейся воды (наиболее эффективно поглощающей тепло нагретой поверхности и тем самым снижающей ее температуру), а также долю воды, не участвующей в процессе охлаждения, можно установить лишь в ходе экспериментальных исследований.

Параметры, определяющие процесс охлаждения поверхности распыленной водой (время пребывания водяной капли в среде пожара  $\tau$ , коэффициент теплоотдачи от среды пожара к потоку распыленной воды и др.), получены из уравнения теплоотдачи от потока распыленной воды к охлаждаемой поверхности, обогреваемой во время пожара:

$$\alpha_{\tau} (t_{\tau}^0 - t_{\tau}^B) F \Delta \tau = \{\rho_B \Delta W_{II} (1 - \varphi) c_0 (t_{\tau+\Delta\tau}^B - t_{\tau}^B) + \varphi c_{II}\} \psi,$$

где  $t_{\tau}^0$  и  $t_{\tau}^B$  — температура орошаемой поверхности и воды в момент  $\tau$ ,  $F$  — площадь орошаемой поверхности;  $\rho_B$  и  $\Delta W$  — плотность и объем воды, необходимой для создания заданной температуры орошаемой поверхности в момент времени  $\tau$ ,  $c_0$  и  $c_{II}$  — теплоемкость и теплота испарения воды,  $\varphi$  — доля испарившейся воды, участвующей в процессе охлаждения,  $\psi$  — коэффициент эффективного использования воды.

После исключения второстепенных факторов, определяющих эффект водоохлаждения, последний был выражен в виде функции от параметров теплоотдачи (от среды пожара к нагреваемой поверхности и к распыленному потоку воды), параметра теплоотдачи распыленного потока воды и коэффициента использования воды в процессе охлаждения. Ниже приведены основные факторы, влияющие на процесс водоорошения:

теплоотдача от среды пожара к распыленному потоку воды (дисперсность водяных капель, скорость их полета, а также расстояние оросителя до орошаемой поверхности);

теплоотдача от распыленного потока воды к орошаемой поверхности (условия подачи воды и состояние смачивания орошаемой поверхности);

полнота использования воды (конструктивные особенности орошаемого оборудования и тип оросителей для подачи воды);

интенсивность водоорошения и конструктивные особенности орошаемой поверхности.

В максимально приближенных к реальным пожарам условиях на макетах технологического оборудования определен расход воды для эффективной работы системы водоорошения. Зависимость эффекта охлаждения от величины удельного расхода воды и условий распределения воды на охлаждаемую поверхность приведена на рис. 91. Эффект водяного охлаждения проверяли при испытаниях макетов стальных колонн в реальных (в системе водоорошения использовали оросители эвольвентные при давлении на входе 0,3—0,5 МПа) условиях по-

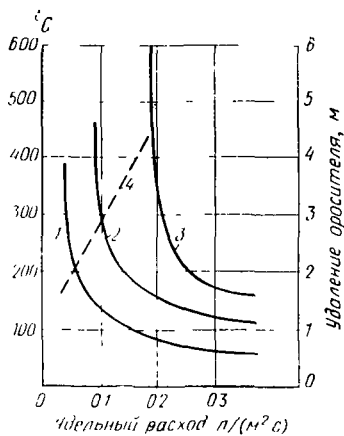
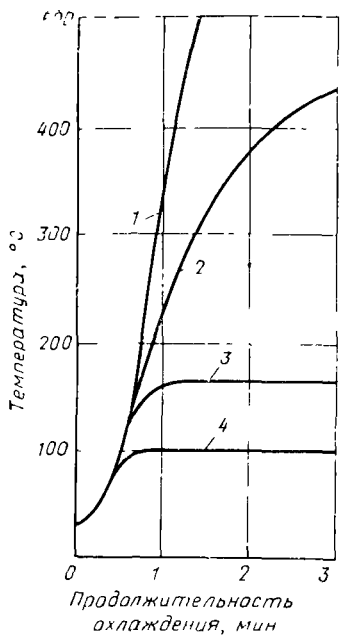


Рис. 92 Удельный расход воды, необходимый для охлаждения, в зависимости от температуры охлаждаемой поверхности и удаления от нее оросителя

1 — ороситель удален на 2 м, 2 — то же, на 3 м, 3 — то же, на 5 м; 4 — расход воды (при  $t_{кр} = 300^\circ\text{C}$ ) в зависимости от удаления оросителя

Рис. 91 Температура поверхности конструкции, охлаждаемой водой (находящейся в пламени  $1100^\circ\text{C}$ ), в зависимости от условия орошения

1 — водяное орошение отсутствует, 2 — орошение с удельным расходом  $0,2 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  (ороситель удален от поверхности на 5 м), 3 — удельный расход  $0,08 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  (ороситель удален на 2 м), 4 — удельный расход  $0,3 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  (ороситель удален на 2 м)

жара. Исследования показали, что удельный расход воды, необходимой для охлаждения конструкций до критической температуры, зависит от температуры охлаждаемой поверхности и удаления от нее водяного оросителя. Графически эта зависимость изображена на рис. 92. Критические значения удельного расхода воды для охлаждения поверхности конструкции, находящейся непосредственно в пламени ( $t \approx 1100^\circ\text{C}$ ), до  $300^\circ\text{C}$  составляют при удалении оросителя от поверхности на 2 м —  $0-0,05 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , при удалении на 3 м —  $0,1 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , при удалении на 5 м —  $0,2 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Установлен также удельный расход распыленной воды для орошения стальных конструкций оросителями эвольвентного типа



[л/(м<sup>2</sup>·с)] при одностороннем орошении стальной конструкции, помещенной в пламя бензина.

Удельный расход распыленной воды 0,18 0,24 0,28 0,32  
 Температура конструкции . . . . . 140 130 120 110 100

### Подача воды для повышения огнестойкости стальных конструкций

Сущность поведения водонаполненных конструкций при воздействии пожара изложена ниже. Температура в расчетных точках сечения конструкции (рис. 93) вычислялась с учетом условий теплопередачи от среды пожара к водонаполненной конструкции. Были составлены три уравнения.

Первое уравнение теплопередачи от среды пожара к наружной поверхности (единицы длины) водонаполненной конструкции, обогреваемой по всей ее боковой поверхности

$$\alpha_{\text{н}}(t_{\text{н}}-t_0)P_0\Delta\tau + [A_{\text{к}}+B_{\text{к}}(t_1-t_0)/2](t_1-t_0)P_1\Delta\tau/\delta = F_0\rho_{\text{к}}(c_{\text{к}}+D_{\text{к}}t_0)(t_{0+\Delta\tau}-t_0), \quad (89)$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  коэффициент теплопередачи от среды пожара к наружной поверхности конструкции;  $t_{\text{н}}$  — температура среды пожара;  $P_0$  и  $\delta$  — периметр наружной поверхности водонаполненной конструкции и ее толщина;  $\Delta\tau$  — расчетный интервал времени;  $A_{\text{к}}$  и  $B_{\text{к}}$  — теплопроводность конструкции и коэффициент, учитывающий ее изменение с увеличением температуры,  $t_0$  и  $t_1$  — температура наружной поверхности конструкции и температура внутренней (смоченной) поверхности конструкции,  $F_0$  — площадь поперечного сечения кольцевого элемента у наружной поверхности конструкции,  $\rho_{\text{к}}$  и  $c_{\text{к}}$  — плотность материала конструкции и ее теплоемкость;  $D_{\text{к}}$  — коэффициент увеличения теплоемкости нагреваемой конструкции.

Второе уравнение теплопередачи от нагретой наружной поверхности водонаполненной конструкции к внутренней ее поверхности

$$[A_{\text{к}} + 0,5B_{\text{к}}(t_{0\tau} + t_{1\tau})] [(t_{0\tau} - t_{1\tau}) P_1 \Delta\tau] / \delta + \alpha_{\text{в}}(t_{\text{в}\tau} - t_{1\tau}) P_2 \Delta\tau = F_1 \rho_{\text{к}}(c_{\text{к}} + D_{\text{к}} t_1)(t_{1\tau+\Delta\tau} - t_{1\tau}), \quad (90)$$

где  $\alpha_{\text{в}}$  — коэффициент теплопередачи от конструкции к смоченной поверхности;  $F_1$  — площадь поперечного сечения кольцевого элемента у внутренней поверхности конструкции,  $t_{\text{в}\tau}$  и  $t_{1\tau+\Delta\tau}$  — температура воды и внутренней поверхности конструкции,  $P_1$  и  $P_2$  — периметр средней и внутренней (смоченной) поверхности конструкции.

Третье уравнение теплопередачи при нагревании воды в результате передачи ей тепла от нагретой поверхности (единицы длины) к водонаполненной конструкции

при температуре воды  $t_{\text{в}} \leq t_{\text{к}}$

$$\alpha_{\text{в}\tau}(t_{1\tau} - t_{\text{в}\tau}) P_2 \Delta\tau = \rho_0 \Delta W_{\tau} c_0 (t_{\text{в}\tau+\Delta\tau} - t_{\text{в}\tau}); \quad (91)$$

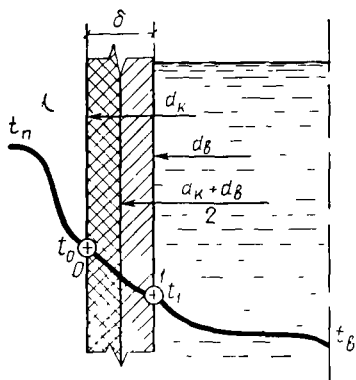


Рис 93 Расчетная схема теплопередачи в водонаполненной конструкции

$t_n$  — температура среды пожара;  $t_0$  — температура на наружной поверхности конструкции;  $t_1$  — температура на внутренней поверхности конструкции;  $t_b$  — температура воды;  $b$  — толщина стенки,  $d_k$  — диаметр (эквивалентный) конструкции;  $d_n$  — диаметр смоченного сечения конструкции

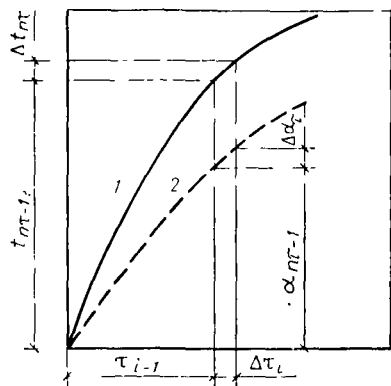


Рис 94. Расчетная схема определения коэффициента теплопередачи  $\alpha_n$  при «стандартном пожаре»

1 — температура среды при пожаре, 2 — коэффициент теплопередачи;  $t_n$  — расчетная температура при пожаре для расчетного интервала времени  $\Delta \tau_i$ ;  $\alpha_{n\tau}$  — расчетный коэффициент теплопередачи

при температуре воды  $t_b \geq t_k$

$$\alpha_{b\tau} (t_1 - t_{b\tau}) \Pi_1 \Delta \tau = \rho_0 \Delta W_\tau [c_0 (t_{b\tau + \Delta \tau} - t_{b\tau}) + c_n], \quad (92)$$

где  $\Delta W$  — объем воды, необходимой для создания огнестойкости водонаполненной конструкции в момент времени  $\tau$ ;  $\rho_0$  и  $c_0$  — плотность и теплоемкость воды;  $c_n$  — скрытая теплота испарения воды

После преобразования уравнения (89) получена формула для определения температуры наружной поверхности водонаполненной конструкции:

$$t_{0\tau} + \Delta \tau = t_{0\tau} + \frac{\Delta \tau \{ [A_k (t_{1\tau} - t_{0\tau}) + 0,5 B_k (t_{1\tau}^2 - t_{0\tau}^2)] \times \rightarrow}{F_0 \rho_k (c_k + D_k t_{0\tau})} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\times \Pi_1 / \delta + \alpha_{n\tau} \{ t_{n\tau} - t_{0\tau} \} \Pi_0}{},$$

где  $t_{n\tau} = 345 \lg (480\tau + 1)$  ( $\tau$  — продолжительность пожара, ч).

Коэффициент теплопередачи  $\alpha_{пт}$ , определяют по формуле

$$\alpha_{пт} = \alpha_k + \alpha_n = 29 + \frac{5,76 S_{пр}}{t_{пт} - t_{от}} \left[ \left( \frac{t_{пт}}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{от}}{100} \right)^4 \right], \quad (93)$$

где  $\alpha_k = 29$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) — коэффициент теплопередачи конвекцией от среды пожара к поверхности конструкции,  $\alpha_n$  — коэффициент теплопередачи излучением,  $S_{пр}$  — приведенная степень черноты системы «среда пожара — наружная поверхность конструкции»;  $S_{пр} = 1/(1/S_1 + 1/S_2 - 1)$  ( $S_1$  — степень черноты пожара,  $S_2$  — степень черноты конструкции).

Значения  $\alpha_{пт}$ , зависящие от изменяющихся во времени значений  $t_{пт}$  и  $t_{от}$  определили по формуле (93) согласно расчетной схеме (рис. 94).

После преобразования уравнения (90) получим формулу для определения температуры внутренней (смоченной) поверхности водонаполненной конструкции

$$t_{1 + \Delta\tau} = t_{1\tau} + \frac{\Delta\tau \{ [A_k (t_{от} - t_{1\tau}) + 0,5 B_k (t_{от}^2 - t_{1\tau}^2)] \times \rightarrow \\ \rightarrow \frac{\times \Pi_1 / \delta + \alpha_{вт} (t_{вт} - t_{1\tau}) \Pi_2}{F_1 \rho_k (c_k + D_k t_{1\tau})} \}$$

В водонаполненных конструкциях разового наполнения (без циркуляции воды при нагревании) теплопередача идет в ограниченном пространстве, поэтому передачу теплоты рассматривали через теплопроводность. Коэффициент теплопередачи от нагретой внутренней поверхности конструкции к воде в этом случае равен:  $\alpha = \epsilon_{к\tau} \lambda / \delta_v$ , где  $\epsilon_{к\tau}$  — коэффициент конвекции;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воды;  $\delta_v$  — расчетная толщина воды в конструкции. Причем

$$\epsilon_k = A_0 \delta_v^4 \sqrt{\Delta t / \delta_v},$$

где  $A_0$  — параметр, зависящий от температуры воды в конструкции,  $\Delta t$  — перепад между температурой стенки и температурой воды

Зависимость  $A_0$  от температуры для удобства расчета преобразовали в выражение  $41 + 11,4 t^{0,405}$ .

После подстановки выражений  $\epsilon_k$  и  $A_0$  в исходное уравнение получили формулу для расчета коэффициента теплопередачи от нагретой внутренней поверхности конструкции к воде в системе разового наполнения, которая одновременно является алгоритмом для расчета на ЭВМ:

$$\alpha_{вт + \Delta\tau} = \epsilon_{к\tau} \lambda / \delta_v = 0,474 [41 + 11,4 [(t_{1\tau} - t_{вт}) / 2]^{0,405}]^4 \sqrt{(t_{1\tau} - t_{вт}) / \delta_v}.$$

Коэффициент теплопередачи от нагретой внутренней поверхности конструкции к протекающей по ней воде определили по формуле

$$\alpha_{в} = Nu \lambda / d_{в},$$

где  $Nu$  — критерий Нуссельта;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воды;  $d_{в}$  — эквивалентный диаметр, равный  $11/111$ ;  $\Gamma_2$  — площадь живого сечения воды.

Для определения значений критерия  $Nu$  при расчете коэффициента теплопередачи использовали эмпирические формулы:  $Nu = f(Re, Pr)$ .

Выражение коэффициента теплопередачи от нагретой внутренней поверхности конструкции к протекающей в ней воде преобразовали в формулу

$$\alpha_{в\tau} = B_{0\tau} (\rho_0 V_{\tau})^n d_{в}^{-m},$$

где  $B_{0\tau} = j + it_{\tau}^x$  — параметр, зависящий от температуры воды в конструкции;  $V$  — скорость течения воды при ее циркуляции в конструкции.

Таким образом, получили формулу для расчета коэффициента теплопередачи от нагретой внутренней поверхности конструкции к протекающей в ней воде:

$$\alpha_{в\tau + \Delta\tau} = \{A + [0,5B (t_{1\tau} + t_{в\tau})]^x (\rho_0 V_{\tau})^n d_{в}^{-m},$$

при  $0 \leq Re \leq 2000$ ;  $j = 5,3$ ;  $i = 0,27$ ;  $x = 0,579$ ;  $n = 0,2$ ;  $m = 0,5$ ; при  $100\,000 \leq Re \leq \infty$ ;  $j = 5$ ;  $i = 1,28$ ;  $x = 0,384$ ;  $n = 0,8$ ;  $m = 0,2$ .

Коэффициент теплопередачи от нагретой внутренней поверхности конструкции к кипящей воде определим по эмпирической формуле

$$\alpha_{в\tau + \Delta\tau} = 22P^{0,58} (t_{1\tau} - t_{в\tau})^{2,33}, \quad (94)$$

где  $P$  — давление кипящей воды.

После преобразования уравнений (91) и (92) получили формулу для определения количества воды, необходимой для создания огнестойкости водонаполненной конструкции:

при температуре воды  $t_{в\tau} < t_k$

$$W_{\tau + \Delta\tau} - W_{\tau} = \alpha_{в\tau} (t_{1\tau} - t_{в\tau}) \Pi_2 \Delta\tau / \rho_0 c_0 (t_{в\tau + \Delta\tau} - t_{в\tau}),$$

при температуре воды  $t_{в\tau} \geq t_k$

$$W_{\tau + \Delta\tau} - W_{\tau} = \alpha_{в\tau} (t_{1\tau} - t_k) \Pi_2 \Delta\tau / \rho_0 [t_k - t_{вн}] c_0 - c_{н}].$$

Таблица 22. Огнестойкость стальных водонаполненных колонн при различных запасах воды

Поперечное сечение, м	Толщина стенки, мм	$\Pi_1$ , м	$W_0$ , м <sup>2</sup>	Огнестойкость, ч, при запасах воды $W_{п}/W_0$ , равных <sup>1</sup>				
				0	1	1,5	2	2,5
0,2×0,2	10	0,78	0,039	0,25	0,42	0,63	0,72	0,92
0,4×0,4	20	1,56	0,156	0,42	0,67	1	1,24	1,4
0,6×0,6	25	2,35	0,354	0,58	0,83	1,18	1,5	1,84
1,0×1	30	3,94	0,996	0,67	0,92	1,5	2	—

<sup>1</sup>  $W_{п}/W_0$  — отношение требуемого объема воды к начальному объему воды в конструкции.

Удельный расход воды, необходимой для создания огнестойкости водонаполненной конструкции (единицы обогреваемой поверхности), установили из выражений

$$G_{\tau + \Delta\tau} = \frac{(n_{\tau + \Delta\tau} - n_{\tau})W}{\Pi_0 \Delta\tau} \quad \text{при } t_{в} < t_{к};$$

$$G_{\tau + \Delta\tau} = \frac{\alpha_{вт} (t_{1\tau} - t_{вт}) \Pi_2}{\rho_0 F_2 c_0 (t_{вт + \Delta\tau} - t_{вт})} \quad \text{при } t_{в} < t_{к}; \quad (95)$$

$$G_{\tau + \Delta\tau} = \frac{\alpha_{вт} (t_{1\tau} - t_{вт}) \Pi_2}{\rho_0 F_2 [c_0 (t_{вт + \Delta\tau} - t_{вт}) + c_{и}]} \quad \text{при } t_{в} \geq t_{к}.$$

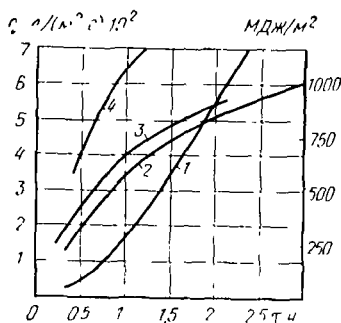


Рис. 95. Основные расчетные параметры для определения расходов воды

1 — количество тепла; 2 — расход воды (по исследованиям автора); 3 — то же (данные работы), 4 — то же данные работы)

После подстановки выражения (94) в уравнение (95) получили формулу для определения удельного расхода воды

$$G_{\tau_k + \Delta\tau} = 22\rho_0^{0,58} (t_{1\tau} - t_k)^{3,33} \Pi_2 / c_{и} \rho_0 F_2.$$

Приведенные выше формулы являются алгоритмом для расчета количества воды, необходимой для создания огнестойкости водонаполненных конструкций. Огнестойкость водонаполненных стальных колонн различного сечения вычислили

на ЭВМ при условии воздействия на конструкцию «стандартного» пожара в зависимости от необходимого запаса воды (табл. 22). Расчеты выполнили для следующих исходных данных:  $\rho_k=7800$ ;  $c_k=0,105$ ;  $A_k=56$ ;  $B_k=-0,0413$ ;  $D_k=1,14 \cdot 10^{-4}$ ;  $\Delta\tau=0,05$ ;  $P=1,2$  и  $3$ ; начальных условий

$$t_{\text{п}\tau=0} = 50 \text{ и } t_{0\tau=0} = 20.$$

Расчетный интервал времени при вычислении не превышал значения

$$\Delta\tau_{\text{макс}} = 30\rho_k(c_k + D_k t) \delta / [\alpha + (A_k + 0,5B_k t) / \delta].$$

Основные расчетные параметры для определения расходов воды приведены на рис. 95.

### Расход воды для создания водяных завес

Эффективность водяных завес в значительной степени зависит от расхода воды, качества ее распыления на капли и условий теплообмена. Расход воды для создания водяных завес, предотвращающих опасность теплового излучения пламени или снижающих температуру нагретых газов, рассчитывают в зависимости от ряда факторов, характеризующих воздействие пожара на защищаемый водяной завесой объект. Поэтому важно знать параметры, характеризующие тепловое воздействие пожара, закономерности распространения тепла (конвекцией, излучением или теплопроводностью) и требования, обуславливающие противопожарную безопасность защищаемого объекта (например, допустимая интенсивность теплового излучения, температура газов и др.). Так, в закрытых объемах производственных помещений основными параметрами, характеризующими воздействие пожара, являются выделяющиеся при пожаре тепло и дым. Для открытых технологических установок наиболее опасно тепловое излучение пламени и поток искр.

При решении задач, связанных с определением мер противопожарной безопасности и формулированием требований к водяным завесам, необходимо знать размеры и положение области пламени пожара, определяющие параметры пожара (внешняя задача тепломассообмена), а также характеристики защищаемого объекта (материал, толщина, условия прогрева и т. п.), т. е. парамет-

ры так называемой внутренней теплотехнической задачи.

Полидисперсные воздушно-водяные и водопенные завесы применяют для снижения теплового излучения пламени. Защитное действие воздушно-водяных завес основано на частичном поглощении и рассеивании теплового излучения в полидисперсном слое воздушно-водяной среды. Интенсивность теплового излучения при прохождении бесконечно малого слоя воздушно-водяной среды  $d\chi$  уменьшается и зависит от физических свойств защитной среды. В дифференциальной форме это может быть записано следующим образом:

$$dI = -\xi I d\chi, \quad (96)$$

где  $\xi$  — коэффициент ослабления теплового излучения, зависящий от физических свойств завесы

Знак минус в выражении (96) указывает на уменьшение интенсивности при удалении от источника. После разделения переменных и интегрирования этого уравнения в пределах от  $\chi=0$  до  $\chi=r$  и от  $I_x=I_0$  до  $I_x=I$  находят величину интенсивности теплового излучения через слой воздушно-водяной среды

$$I = I_0 e^{-\xi r}.$$

Значения коэффициента  $\xi$  для различных защитных сред определили экспериментально при излучении пламени природного газа, имеющего интенсивность теплового выделения  $q_0=2,3$  МВт/м<sup>2</sup> и температуру пламени 1200 К. Для определения показателя поглощения воздуха  $\xi_0$  измерили излучение на высоте 1,7 м от уровня земли через каждые 3 м. Коэффициент  $\xi_0$  вычислили по формуле:

$$\xi_0 = -[\ln(I/I_0)]/r_0,$$

где  $I$  — интенсивность теплового излучения в  $n$ -й точке ( $n$  может принимать значения 1, 2, 3, 4, 5);  $I_0$  — интенсивность теплового излучения пламени,  $r_0$  — расстояние от оси пламени до точки.

Опыты проводили при температуре воздуха 10 °С и влажности 64 %. При этих параметрах  $\xi_0=0,1$ . Эффективность различных видов воздушно-водяных завес проверяли на экспериментальной установке, на которой изменяли расход воды при постоянном напоре и глубине завесы. Удельный расход воды завесы глубиной  $r$  определяют по формуле

$$x = q/(lh),$$

где  $x$  — удельный расход, отвесный к вертикальной проекции завесы, л/(м<sup>2</sup>·с),  $q$  — производительность оросителя, л/с;  $l$  и  $h$  — соответственно длина и высота воздушно-водяной завесы, м.

При наличии двух поглощающих сред (воздух, воздушно-водяная или водопенная завеса) изменение интенсивности теплового излучения определяют по формуле

$$\ln(I_0/I) = \xi_0(r_0 - r) + \xi r,$$

где  $I_0$  и  $I$  — интенсивности теплового излучения пламени и в рассматриваемой точке, Вт/м<sup>2</sup>;  $\xi_0$  и  $\xi$  — коэффициенты поглощения теплового излучения воздухом и завесой,  $r_0$  и  $r$  — толщина слоя воздуха и завесы, м

Требуемый удельный расход воды завесы определяют по формуле

$$\kappa = [\ln(I_0/I) - \xi_0(r_0 - r)] / (fr),$$

где  $f$  — коэффициент эффективности завесы, м · с/л

Полидисперсные завесы применяют для снижения температуры нагретых газов. Поток нагретых газов при прохождении через слой водяной завесы охлаждается от  $\theta_0$  до  $\theta_1$ , при этом капли воды нагреваются от  $t_1$  до  $t_0$ . Количество тепла, полученное водой (отданное газами), и количество испарившейся воды описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} G_B c_{pB} dt &= \alpha_V (t - \theta) dV - c_n dG_n; \\ G_G c_{pG} d\theta &= -\alpha_V (\theta - t) dV; \\ \beta_V (P_n'' - P_n) dV &= 2,6Gd [P_n / (P_0 - P_n)], \end{aligned} \right\} \quad (97)$$

где  $G_B$  — расход воды, кг/с;  $G_G$  — расход сухих нагретых газов, кг/с;  $G_n$  — количество испарившейся воды, кг/с;  $c_{pB}$  и  $c_{pG}$  — теплоемкость воды и газов соответственно, кДж/(кг · К);  $\theta$  и  $t$  — температура газов и воды соответственно, К;  $\alpha_V$  — объемный коэффициент теплоотдачи, кВт/(м<sup>3</sup> · К);  $\beta_V$  — объемный коэффициент массоотдачи, кг/(Па · м<sup>3</sup> · с);  $V$  — объем завесы, м<sup>3</sup>;  $c_n$  — теплота парообразования, кДж/кг;  $P_n''$  и  $P_n$  — парциальное давление у поверхности испарения и в газовом потоке, Па;  $P_0$  — барометрическое давление, Па.

Первое уравнение отражает баланс тепла элементарного объема воды на элементарном участке пути с учетом тепла, идущего на испарение, второе — элементарного объема газа на элементарном участке пути и третье — описывает процесс массопереноса вследствие испарения воды.

Для удобства решения система уравнений (97) представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} dt/d\omega &= \alpha_V (t - \theta) / \beta_V - c_n (P_n'' - P_n); \\ d\theta &= A (t - \theta); \\ dP_n/d\omega &= B (P_n'' - P_n), \end{aligned} \right\} \quad (98)$$

где  $A = \alpha_V / (\beta_V c_{pG} \lambda)$ ;  $B = P_{Г ср} / (2,6 \lambda')$ ;  $P_{Г ср} = P_0 - P_n$  — среднее парциальное давление сухих газов, Па;  $\lambda' = G G_n$  — относительный расход газов и воды,  $\omega = V \beta_V / G_B$  — независимая переменная величина, м<sup>2</sup>/кг.



Решая систему уравнений (98), получим:

$$\left. \begin{aligned} t &= c_1 h_1 e^{y_1 \omega} + c_2 h_2 e^{y_2 \omega} + c_3; \\ \theta &= c_1 e^{y_1 \omega} + c_2 e^{y_2 \omega} + c_3; \\ P_{\text{п}} &= c_1 \frac{y_1}{c_{\text{и}}} (h_1 - \Delta) e^{y_1 \omega} + c_2 \frac{y_2}{c_{\text{и}}} (h_2 - \Delta) e^{y_2 \omega} + P_{\text{п}}'' \end{aligned} \right\},$$

где  $h_1 = 1 + y_1/A$ ;  $h_2 = 1 + y_2/A$ ,  $\Delta = \alpha_v / (\lambda \beta_v)$ ,  $y_1, y_2$  — корни характеристического уравнения,  $c_1, c_2, c_3$  — постоянные интегрирования

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{A^2 (t_0 - \theta_0) (\Delta - h_1) - A c_{\text{и}} (P_{\text{п}}'' - P_0)}{y_1 (y_1 - y_2)} \\ c_2 &= \frac{A^2 (t_0 - \theta_0) (\Delta - h_1) - A c_{\text{и}} (P_{\text{п}}'' - P_0)}{y_2 (y_2 - y_1)} \\ c_3 &= \theta - c_1 c_2 \end{aligned} \right\},$$

где  $P_0$  — парциальное давление пара в газовом потоке при температуре  $\theta$

Объемный коэффициент теплоотдачи определяют по формуле

$$\alpha_v = Q / V \Delta t,$$

где  $Q = \rho c_{\text{пр}} G_{\text{г}} (\theta_0 - \theta_1)$  — количество тепла, отданного газами в единицу времени, кВт;  $\Delta t = \frac{[(\theta_0 - t_1) - (\theta_1 - t_0)]}{\ln [(\theta_0 - t_1) / (\theta_1 - t_0)]}$  — температурный напор, К.

Для случая когда поток нагретых газов и капли воды движутся навстречу друг другу, А. М. Кушнарским получена следующая зависимость для определения  $\alpha$  [ккал/(м<sup>3</sup>·ч·°С)]:

$$\alpha_v = 92 \omega^{0,97} \kappa^{0,52},$$

где  $\kappa$  — плотность орошения, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $\omega$  — скорость движения нагретых газов м/с

Формула применима для оросителей винтового типа при  $\omega = 0,5 - 3,5$  м/с,  $\kappa = 1,1 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с) и давлении перед оросителем 100—600 кПа.

Для расчета плотности орошения водяных завес при защите проемов в противопожарных преградах спринклерно-дренчерными установками В. Ф. Ходаковым предложена эмпирическая формула

$$T_1/T_2 = 3 [\kappa / \omega d]^{0,48},$$

где  $T_1, T_2$  — температуры воздуха до и после завесы  $\kappa$  — плотность орошения, м<sup>3</sup>/(м·с);  $\omega$  — скорость движения нагретых газов, м/с,  $d$  — диаметр капель (средний) водяной завесы, мм.

При  $T_1 = 580$  К,  $T_2 = 300$  К и  $d = 0,25$  мм  $\kappa = 0,3$  л/(м·с).

Полученные закономерности дают возможность определять параметры водяных завес и выбирать рациональные условия их применения при проектировании систем противопожарного водоснабжения.

## 7 ПОТРЕБЛЕНИЕ ВОДЫ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ПЕРЕДВИЖНОЙ ТЕХНИКОЙ

Для выявления картины фактического потребления воды при тушении пожаров на промышленных предприятиях автором использовалась статистическая информация о расходах воды, потребляемой передвижной противопожарной техникой при ликвидации пожаров объектов, относящихся к различным отраслям промышленности. Для анализа были выбраны пять отраслей промышленности, каждая из которых характеризовалась определенным и приблизительно равным уровнем пожарной опасности. Статистическая информация для каждой отрасли промышленности учитывала огнестойкость строительных конструкций зданий и их этажность. Результаты обработки статистических данных о фактическом потреблении воды при тушении пожаров приведены ниже.

Химическая промышленность<sup>1</sup> охватывает такие промышленные объекты, как станции (газогенераторные, компрессорные по перескачке горючих жидкостей, промывочно-пропарочные и др.); цехи (бензино-экстракционные, гидрирования, дистилляции, газо-фракционирования, производства искусственного жидкого топлива, рекуперации, ректификации органических растворителей с температурой вспышки 28 °С и ниже); участки обработки металлического натрия; комплексы производства искусственного волокна; отделения производства синтетического каучука, регенерации смазочных масел, полимеризации синтетического каучука и т. п.

В результате обработки статистических данных установлено, что расход воды для тушения пожара увеличивается в зависимости от размера пожара и продолжительности свободного горения. Численные значения этих факторов (при прочих равных условиях пожарной опасности объекта) увеличиваются по мере роста этажности здания.

---

<sup>1</sup> Здесь принято условное название отрасли, так как сюда включены объекты нефтеперерабатывающей, нефтехимической и другие, родственные химической отрасли народного хозяйства.

Размер пожара является одним из основных факторов, определяющих пожарную опасность здания и интенсивность подачи воды при пожаротушении. Он зависит от характеристики размещаемых в здании горючих веществ, продолжительности свободного горения (времени с момента возникновения пожара до момента начала его тушения), продолжительности пожаротушения, категории пожарной опасности производства и других факторов, которые трудно учесть при обработке информации. Статистические данные о пожарах в промышленных зданиях химической промышленности показывают: площадь пожара в здании (для определенной категории объектов) возрастает прямо пропорционально его этажности. Зависимость размера пожара  $F/F_*$  ( $F$  — площадь пожара,  $F_*$  — площадь пожара в одноэтажном здании) от этажности здания приведена ниже.

Число этажей . . . . .	1	2	4
$F/F_*$ . . . . .	1	1,5	2

Увеличение размера пожара в многоэтажных производственных зданиях по отношению к размеру пожара в одноэтажном здании объясняется сложностью выполнения тактических приемов подачи воды для пожаротушения по мере увеличения отметки расположения очага пожара над уровнем земли. Вместе с этим для организации тактических приемов и расстановки сил и средств затрачивается дополнительное время на разведку пожарной ситуации и реализацию планов развертывания переносных средств подачи и распределения воды для тушения пожара в верхних этажах здания. Это приводит к тому, что продолжительность свободного горения в многоэтажных зданиях выше, чем в одноэтажных. Ниже приведена зависимость относительной величины продолжительности свободного горения  $\tau/\tau_*$  ( $\tau_*$  — продолжительность свободного горения в одноэтажном здании) от этажности здания.

Число этажей . . . . .	1	2	4
$\tau/\tau_*$ . . . . .	1	1,4	1,8

Статистические данные о фактических расходах воды дают возможность определить режим потребления воды

пожарной техникой при тушении пожаров и уточнить расчетное количество воды. Кроме того, статистические данные дают основание говорить о необходимости учета этажности здания и характеристики пожарной опасности производства при назначении требуемого расхода воды для тушения пожаров. Статистические данные о фактических расходах, наблюдаемых при пожаротушении, показывают, что эти расходы колеблются в диапазоне от 25 до 600 л/с, а иногда и выше. Данные наблюдений позволяют установить, во сколько раз расходы, необходимые для тушения пожаров в той или иной группе объектов, были больше какого-либо заданного расхода или равны ему. Для этой цели информацию о фактических расходах воды располагали в ранжированный ряд (в возрастающем порядке). Значению первого члена (расход  $Q_1$ ) этого ряда отвечает определенное число случаев  $P_1$  (в % от общего числа случаев), значению второго члена  $Q_2$  — число случаев  $P_2$  и т. п. Если на ось абсцисс отложить расходы воды  $Q$ , а на ось ординат  $P$  соответствующее общее (суммарное) число рассматриваемых пожаров, то в координатной системе рассматриваемый ряд изображается в виде прямоугольных столбиков. С увеличением числа наблюдений верхние концы этих столбиков, сливаясь, образуют плавную кривую, показывающую зависимость расходов воды от интегрального (суммарного) числа анализируемых пожаров. Эта кривая в соответствии с терминологией математической статистики является интегральной кривой распределения случайной величины расхода воды для тушения пожара. Используя методы математической статистики, было показано, что случайная величина расхода воды при тушении пожаров в производственных зданиях описывается показательным законом распределения

$$\left. \begin{aligned} F(Q) &\equiv P\{Q \leq Q_n\} = 1 - e^{-Q/Q_*} \\ \epsilon(Q) &= 1 - P\{Q \leq Q_n\} \end{aligned} \right\}, \quad (99)$$

где  $P\{Q \leq Q_n\}$  — вероятность того, что для тушения пожаров не потребуются расход воды больше, чем  $Q_n$ .  $Q_*$  — среднее значение расхода воды для тушения пожара (математическое ожидание).

По статистическим данным определены значения расходов воды (табл. 23) для тушения пожаров в производственных зданиях химической промышленности категории пожарной опасности А и Б, имеющих I и II степени огнестойкости строительных конструкций.

**Таблица 23. Расходы воды для тушения пожаров в производственных зданиях химической промышленности**

Этажность	Расходы, л/с, при вероятности водобеспечения, равной						
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	40	76	95	130	198	255	360
2	68	130	165	240	340	440	630
3—5	104	190	250	360	520	660	—

**Таблица 24. Расходы воды для тушения пожаров в производственных зданиях деревообрабатывающей, бумажной и текстильной отраслей промышленности**

Этажность	Расходы, л/с, при вероятности водобеспечения, равной						
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	25	45	60	90	125	175	230
2	43	78	105	157	218	306	402
3—5	67	120	160	240	330	470	620

Значения  $Q_*$  для производственных зданий химической промышленности в зависимости от их этажности приведены ниже.

Этажность . . . . .	1	2	3—5
Расход $Q_*$ , л/с . . . . .	263	458	791

Для удобства определения численных значений вероятности водобеспечения  $P$  и размера риска, отвечающих расчетному значению расхода  $Q_i$ , рекомендуется график  $P=f(Q_i/Q_*)$  и  $\epsilon=\varphi(Q_i/Q_*)$  (рис. 96), отвечающий экспоненциальной функции (99). Приведенные данные показывают, что при тушении пожаров в производственных зданиях химической промышленности потребление воды в несколько раз превышает расчетное, регламентируемое требованиями норм строительного проектирования.

Фактические расходы воды для тушения пожаров объектов деревообрабатывающей, бумажной и текстильной промышленности проанализированы на основании статистической информации о тушении пожаров в цехах бумажной промышлен-

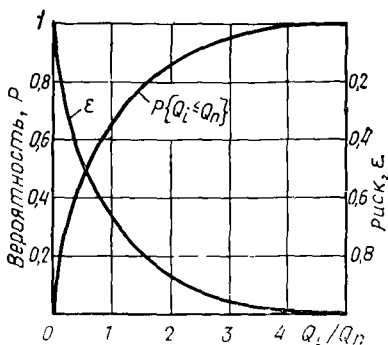


Рис 96 Интегральная функция распределения и зависимость  $\varepsilon = \varphi(Q_i/Q_*)$  расходов воды для тушения пожаров

$Q_i$  — расчетное значение расхода  
 $Q_*$  — среднее значение (математическое ожидание) расхода воды

ности с сухим и мокрым процессами производства, лесопильных и деревообрабатывающих цехах, участках бондарного производства, текстильных фабриках, швейных цехах и фабриках трикотажного производства. По статистическим данным определены расходы воды (табл. 24), которые были зафиксированы при тушении пожаров в производственных зданиях (I и II степени огнестойкости) деревообрабатывающей, бумажной и текстильной отраслей промышленности.

Значения  $Q_*$  для производственных зданий деревообрабатывающей, бумажной и текстильной отраслей промышленности в зависимости от их этажности приведены ниже.

Этажность . . . . .	1	2	3—5
Расход $Q_*$ , л/с . . . . .	105	175	270

Приведенные результаты статистической обработки информации о потреблении воды передвижной пожарной техникой при тушении пожаров показывают, что фактические расходы воды существенно превышают расчетные, принимаемые в соответствии с требованиями действующих норм проектирования.

Фактическое потребление воды при ликвидации пожаров в производственных объектах металлообрабатывающей промышленности проанализировали по статистическим данным о расходах воды, потребляемой передвижной пожарной техникой для тушения пожаров в цехах горячей прокатки металлов, литейных участках, плавильных отделениях и цехах термической обработки металла. Результаты статистического анализа данных о потреблении воды при ликвидации пожаров в производственных зданиях (I и II степени

**Таблица 25 Расходы воды при ликвидации пожаров в производственных зданиях металлообрабатывающей промышленности**

Этажность	Расходы, л/с, при вероятности водообеспечения, равной						
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	15	27	36	54	75	105	140
2	18	33	45	68	94	130	170
3—5	20	36	48	72	100	140	180

**Таблица 26. Расходы воды для тушения пожаров в зданиях тепловых, атомных и гидравлических электростанций**

Этажность	Расходы, л/с, при вероятности водообеспечения, равной					
	0,2	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7
1	100	250	450	600	900	1250
2—5	150	400	720	960	1400	2000

огнестойкости) металлообрабатывающей промышленности приведены в табл. 25.

Значения  $Q_*$  для производственных зданий металлообрабатывающей промышленности в зависимости от их этажности приведены ниже.

Этажность . . . . .	1	2	3—5
Расход $Q_*$ , л/с . . . . .	60	75	80

Потребление воды при тушении пожаров в производственных зданиях машиностроительной промышленности установили на основании статистической информации о расходах воды, потребляемой во время ликвидации пожаров в цехах механической и холодной обработки металла, инструментальных цехах и других объектах этой отрасли промышленности. Значения  $Q_*$  для одноэтажных производственных зданий I и II степеней огнестойкости машиностроительной промышленности составляют 40 л/с; для двух-, пятиэтажных — 60 л/с.

Потребление воды при ликвидации пожаров в производственных зданиях и сооружениях энергетической промышленности установили в результате обработки статистических данных о суммарных расходах воды, потребляемой во время лик-

видации пожаров в производственных зданиях тепловых, атомных и гидравлических электростанций. Результаты статистического анализа этих данных приведены в табл. 26. Причем значения  $Q_*$  для одноэтажных производственных зданий тепловых, атомных и гидравлических зданий составляют 1000 л/с, многоэтажных — 1600 л/с.

### Факторы, определяющие потребление воды

Анализ данных о фактическом потреблении воды при тушении пожаров показывает, что расход воды для тушения пожаров (при прочих равных условиях категории пожарной опасности производства, объема здания, огнестойкости строительных конструкций) увеличивается по мере роста этажности здания. Статистические данные о пожарах в производственных зданиях химической промышленности показывают (рис. 97), что при увеличении этажности зданий с одного до четырех этажей расход увеличивается в три раза, в машиностроительной промышленности — в 1,75 раза и т. п. Причем с увеличением этажности здания снижается вероятность водообеспечения. В химической промышленности, например, увеличение этажности зданий с одного до четырех приводит к уменьшению вероятности водообеспечения с 0,55 (вероятность водообеспечения, соответствующая расходам воды по нормам) до 0,3. Расходы воды для тушения пожаров в производственных зданиях США определяют с учетом факторов, указанных в табл. 27.

В результате анализа статистических данных о расходах воды, потребляемой пожарной техникой при тушении пожаров в производственных зданиях, и опыта проектирования противопожарного водоснабжения за рубежом можно сделать вывод о необходимости уче-

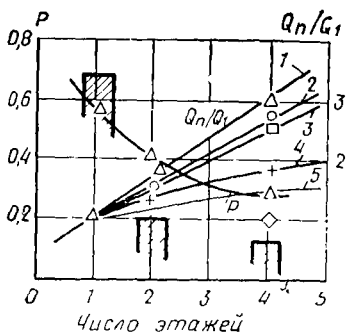


Рис 97 Расход воды для тушения пожара и вероятность водообеспечения в многоэтажных производственных зданиях  
 1 — химическая промышленность  
 2 — деревообрабатывающая, 3 — энергетика; 4 — машиностроение  
 5 — металлургия,  $Q_n$  — расход воды в многоэтажном здании,  $Q_1$  — то же в одноэтажном здании,  $P$  — вероятность водообеспечения (химическая промышленность // // // — для пожаров в зданиях



**Таблица 27. Расходы воды для тушения пожаров в производственных зданиях**

№ п. п.	Фактор	Формула расхода воды, л/с	Предельные значения расхода	
			л/с	%
1	Площадь противопожарного отсека А, м <sup>2</sup>	$63 + 0,0098A$	316	—
2	Число этажей	$31,6(N - 1)$	190	—
3	Противопожарный разрыв	В зависимости от местных условий	210	—
4	Категория пожарной опасности	Не более 1/3 суммы, указанной в пп. 1—3	160	—
5	Среднее значение расхода воды		438	100
6	Минимально допустимый расход		126	29
7	Расход для первичных средств тушения		32	7

та этажности зданий при определении расчетного расхода воды. При оценке расчетного расхода воды целесообразно учитывать высоту здания, а не его этажность. Зависимость расхода воды для тушения пожара от высоты производственного здания приведена ниже.

Высота здания, м . . . . .	10	25	50	75
Расход . . . . .	1	1,2	1,4	1,6

Обеспечить бесперебойность подачи воды при пожаротушении на отметку, превышающую 25 м над уровнем земли, передвижными средствами пожаротушения представляет большие трудности, поскольку для работы ствола с диаметром выходного отверстия 16 мм (при радиусе действия компактной части струи 16 м) передвижной пожарной насос должен создавать напор 70—80 м. Однако для пожарных рукавов (бывших определенное время в эксплуатации) этот напор является предельным. Следовательно, с увеличением высоты подъема воды надежность водообеспечения насосно-рукавными системами уже не гарантируется. В связи с этим в зданиях высотой свыше 25 м необходимо предусматривать специальные металлические сухотрубопроводы по аналогии с внутренним противопожарным водопроводом, которые выполня-

ют функции первичных средств пожаротушения и используются подразделениями пожарной охраны для тушения наружных пожаров на большой высоте. Действующие нормы проектирования противопожарного водоснабжения предусматривают для промышленных зданий высотой свыше 50 м строительство подобных водопроводов, рассчитанных на одновременную подачу восьми пожарных струй с расходом 5 л/с каждая.

## **8 ПРОТИВОПОЖАРНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, СООРУЖЕНИЙ И ОБЪЕКТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ПОД ОТКРЫТЫМ НЕБОМ**

Технологические установки, резервуары с горючими жидкостями и газами, насосные, компрессорные, колонны и другие объекты, как правило, размещаются под открытым небом и характеризуются повышенной пожарной опасностью. Системы противопожарного водоснабжения этих отраслей промышленности имеют специфические особенности, которые обусловлены высокой пожарной опасностью технологических процессов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородных газов и жидкостей.

Пожары на складах лесоматериалов характеризуются высокой скоростью распространения огня, большим тепловым излучением и возможностью образования мощных конвективных потоков, способствующих переносу искр и огня на соседние объекты и возникновению новых очагов горения. Скорость распространения пламени по штабелю досок составляет 1—4 м/мин. По мере увеличения площади пожара скорость распространения огня возрастает. Высота факела светящейся части пламени в среднем в 2—3 раза превышает высоту штабелей. Даже незначительный ветер наклоняет пламя, которое перекрывает разрывы между штабелями. Для локализации пожара в границах квартала (при 25-метровых разрывах) требуется подавать воду по фронту огня с интенсивностью 0,6 л/с на 1 м (полный расход может достигнуть нескольких сотен литров в секунду). Практикой установлено, что для тушения пожаров передвижными автонасосами затрачивается время, равное времени распространения огня по всему кварталу.

Очень быстро развивается пожар в складах балансовой древесины, где она хранится в кучах высотой до

30 м, объемом до 250 000 м<sup>3</sup>. Тушение пожаров таких объектов передвижными средствами не оправдывает себя. Отсюда возникает необходимость создания таких систем водоснабжения, которые обеспечили бы быструю подачу достаточного количества воды в очаг горения.

### **Противопожарное водоснабжение объектов химической и нефтеперерабатывающей промышленности**

Системы противопожарного водоснабжения нефтеперерабатывающих заводов, проектируемые различными проектными институтами, имеют разнообразные технологические схемы, в которых применяют разнотипное оборудование. На современных нефтеперерабатывающих комплексах применяют многофункциональные системы, предназначенные специально для целей противопожарной защиты. Вместе с этим используют объединенные системы водоснабжения для подачи воды на промышленные, питьевые и противопожарные цели. Примером сложной многофункциональной системы является система противопожарного водоснабжения товарно-сырьевой базы (склада нефти и продуктов ее переработки) нефтеперерабатывающего завода. Эта система предназначена для подачи воды в передвижную пожарную технику, стационарные установки пенного пожаротушения и оборудование водоорошения резервуаров с нефтью и продуктами ее переработки. Требуемые расходы воды, на подачу которой (в течение нормативной продолжительности) рассчитывают параметры водопроводных сооружений (емкости для хранения воды, производительность и мощность насосно-силовых агрегатов, пропускная способность водопроводных сетей и т. п.), приведены в табл. 28.

Система противопожарного водоснабжения включает: помещение насосной станции с двумя группами насосно-силового оборудования (для подачи воды и водного раствора пенообразователя); резервуары для хранения запаса воды; две нитки водопроводной сети (для подачи воды и водного раствора пенообразователя), колодцы и камеры для размещения запорно-пусковой арматуры и контрольно-пусковых узлов для включения подачи водного раствора пенообразователя в стационарные генераторы пены. В помещении насосной размещены также дозаторы пенообразователя, емкость с пено-

Таблица 28. Требуемые расходы воды для расчета параметров водопроводных сооружений

Емкость резервуара, тыс. м <sup>3</sup>	Расходы воды, л с <sup>-1</sup>		
	для неогашения	для водоорошения	общий
5	22—35	65	87—100
10	45—75	100	145—175
20	80—145	135	225—280
30	125—200	160	285—360
50	145—230	350	495—580

образователем и автоматика включения насосных агрегатов и аварийного переключения рабочих агрегатов на резервные. Вместимость емкостей для хранения запасов воды рассчитана из условия бесперебойной подачи воды в установку пенного пожаротушения, систему водоорошения резервуаров и передвижную пожарную технику. Водопроводные сети имеют кольцевую разводку и оборудованы арматурой для обеспечения бесперебойного водообеспечения при авариях на участках сети. Трубопроводы для подачи воды и водного раствора пенообразователя уложены в одной траншее в две нитки и не имеют системы блокировки. Давление в водопроводной сети 0,8 МПа в режиме ожидания (постоянно) создается автоматическим водопитателем. Для отбора воды передвижной пожарной техникой на водопроводной сети предусмотрены пожарные гидранты. Водный раствор пенообразователя в стационарные генераторы подается автоматически при включении контрольно-пусковых узлов.

Система противопожарного водоснабжения нефтеперерабатывающего завода рассчитана из условия подачи воды и водного раствора пенообразователя для ликвидации двух одновременно возникших на заводе пожаров: одного — в резервуаре с продуктами переработки нефти, другого — на очистных сооружениях (в аварийном амбаре). Приведенные в табл. 29 расчетные расходы воды и водного раствора пенообразователя показывают, что система водоснабжения и их водопроводные сооружения рассчитывают на расходы воды, превышающие 660 л/с.

Для бесперебойной подачи воды для тушения пожаров в технологическом комплексе предусмотрена автоматизированная система противопожарного водоснабже-

Таблица 29. Расчетные расходы воды для тушения пожаров на нефтеперерабатывающем заводе

Пожары	Расход воды и водного раствора пенообразователя, л с <sup>-1</sup>		
	для тушения	для орошения	общий
Первый	144	114	258
Второй	46	—	46
Итого	550	114	664

ния, которая содержит три резервуара с водой вместимостью по 2 тыс. м<sup>3</sup> каждый; две емкости с пенообразователем по 50 т каждая; насосную станцию с общей подачей насосно-силовых агрегатов 680 л·с<sup>-1</sup>, напором—89 м, мощностью 680 кВт; водопроводную сеть для подачи воды в систему охлаждения горящего и соседних с ним резервуаров и пожарные гидранты; водопроводную сеть для подачи водного раствора пенообразователя в стационарные установки пожаротушения и стационарные установки пожаротушения и стационарные пенные камеры.

Технико-экономические показатели системы противопожарного водоснабжения нефтеперерабатывающего комплекса (тыс. руб.) приведены ниже.

Капитальные вложения на строительство трех резервуаров для хранения пожарного запаса воды (по 2 тыс. м <sup>3</sup> каждый) . . . . .	86
Затраты на строительство насосной станции (со складом пенообразователя) . . . . .	221
Капитальные вложения в водопроводную сеть для подачи водного раствора пенообразователя (с камерами и колодцами) . . . . .	504,8
Водопроводная сеть систем противопожарного водоснабжения . . . . .	700

Водопроводная сеть имеет две независимые питки подземных трубопроводов (рис. 98), первая из которых предназначена для подачи воды, вторая — для водного раствора пенообразователя. Водопроводные сети в режиме ожидания постоянно содержатся под рабочим давлением 0,8 МПа, что приводит к большим утечкам воды и водного раствора пенообразователя через неплотности соединений труб, арматуры и другого водопроводного оборудования. Опыт эксплуатации таких водопроводов показывает, что ежегодно через неплотности соединений в системе непроизводительно теряется свыше

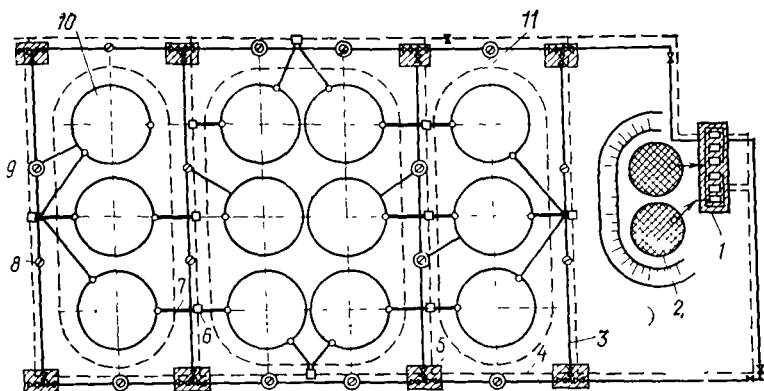


Рис 98 Принципиальная схема противопожарного водоснабжения товарно-сырьевой базы

1 — насосная станция для подачи воды и водного раствора пенообразователя, 2 — резервуары для хранения воды, 3 — противопожарный водопровод, 4 — водопроводная сеть для подачи водного раствора пенообразователя, 5 — водопроводные колодцы с задвижками; 6 — камеры с контрольно пусковыми узлами, 7 — сухотрубы, 8—9 — колодцы с пожарными гидрантами 10 — резервуар с нефтью и продуктами ее переработки, 11 — сухотруб

700 м<sup>3</sup> воды и 45 м<sup>3</sup> пенообразователя. Для поддержания рабочего давления воды и пенообразователя в водопроводной сети ежегодно расходуется свыше 260 кВт·ч электроэнергии.

В результате сбора статистических данных о работе водопроводных сетей были выявлены факторы, обуславливающие недостаточную надежность и экономичность водопроводов. Эти факторы приведены ниже:

раздельная подача воды в установки водоорошения, тушения и передвижную пожарную технику;

высокое давление воды в водопроводной сети в режиме ожидания;

резкое повышение давления воды в водопроводе при пуске насосно-силового оборудования;

нерациональная схема децентрализованной подачи воды;

возможность возникновения недопустимого давления в водопроводной сети при пуске и выключении подачи воды.

Для систем подачи и распределения воды во все виды установок водяного и водопенного тушения пожаров с расходом воды 100—300 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup> разработаны типовые проекты автоматических насосных станций. Автоматиче-

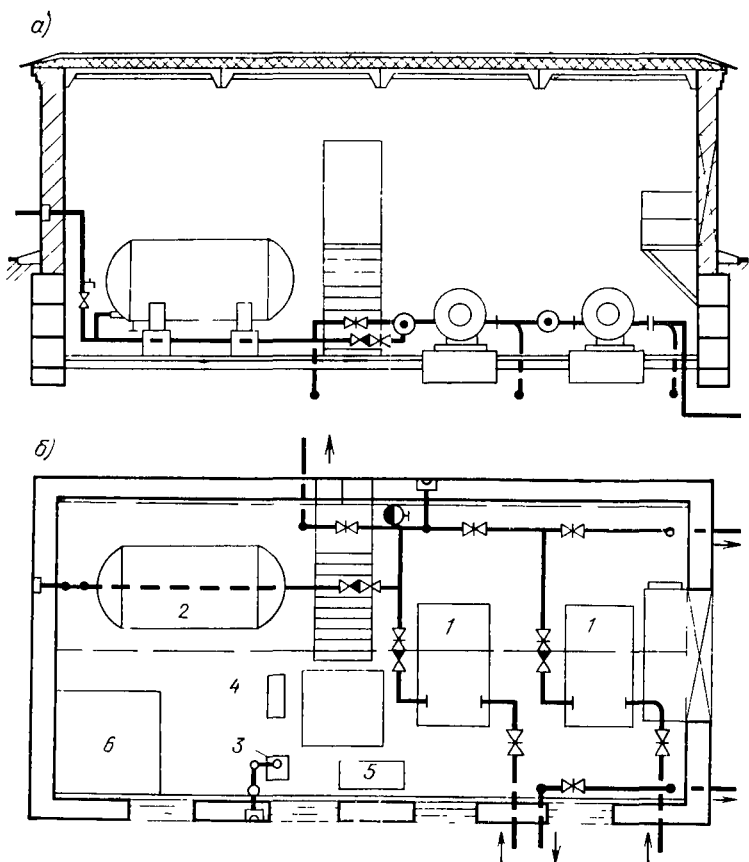


Рис. 99. Автоматическая насосная станция производительностью 600—1000 м<sup>3</sup>/ч

*а* — разрез; *б* — план, 1 — центробежный насос с электродвигателем, 2 — гидронивелирующая установка; 3 — центробежно-вихревой насос для удаления дренажных вод; 4 — компрессор; 5 — бак заливки насосов; 6 — шкаф управления

ская насосная станция для систем подачи и распределения воды в установки водяного и пенного тушения пожаров с подачей воды 600—1000 м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup> показана на рис. 99.

Характеристики лопастных насосов и асинхронных электродвигателей, используемых в насосных станциях противопожарного водоснабжения на основании данных каталогов-справочников, приведены в табл. 30—31.

**Таблица 30. Характеристики лопастных насосов, используемых в водопитателях систем противопожарного водоснабжения**

Марка насоса	Подача, л·с <sup>-1</sup>	Напор, м	Мощность, кВт	КПД, %	КПД <sup>1</sup> , %
6НДС	84—92	60—64	62—77	76—79	90
12НДС	250—4350	60—64	177—250	84—88	92
14НДС	300—450	73—78	280—386	82—89	93—96
18НДС	750	58	470	91	96
8НДв	150—200	74—76	138—192	79—80	92
10Д6	111—139	65—70	102—115	75—76	91
12Д6а	176—250	62—75	164—208	75	92
12Д-9	167	61	130	78	92
20Д-6а	600	76	620	75	96

<sup>1</sup> Коэффициент полезного действия на валу агрегата.

**Таблица 31. Характеристики асинхронных трехфазных электродвигателей, используемых для привода лопастных насосов**

Двигатель	Мощность, кВт	КПД, %
АК-3	90—200	91,5—94,3
АЗ-315	110—800	92—94,3
АЗ-355М	132—315	93
ТД-2	315	94,6
АТД-2	410—630	95,2—95,4

Контрольно-пусковой узел, размещаемый на водопроводной сети, предназначен для включения и выключения подачи воды и водного раствора пенообразователя при отборе воды из водопровода. Контрольно-пусковые узлы размещают в водопроводных колодцах или специальных подземных камерах. Контрольно-пусковой узел, расположенный в подземной камере, затрудняет нормальные условия его эксплуатации. Кроме того, возникают неудобства в техническом обслуживании элементов контрольно-пускового узла, вызванные загазованностью внутреннего пространства камеры парами воздушно-бензиновой смеси взрывоопасной концентрации и заполнением значительной части камеры грунтовыми и поверхностными водами.



В результате анализа статистических данных об эксплуатации противопожарных водопроводов выявлены причины нарушения работоспособности контрольно-пускового узла с пневмогидравлической побудительной системой автоматики:

просачивание грунтовых и поверхностных вод, а также аккумулярование воды от утечек через неплотности соединения труб и арматуры;

ошибочные действия обслуживающего персонала, вызванные стесненными условиями размещения узла, повышенной влажностью и плохой освещенностью внутреннего пространства подземной камеры, а также загазованностью пространства камеры паровоздушной смесью углеводородов;

пониженные температуры окружающей среды, приводящие к замерзанию грунтовых вод, расположенных выше глубины промерзания грунта;

длительность (большая трудоемкость) процесса обнаружения неисправности контрольно-пускового узла, продолжительное время и высокая трудоемкость технического обслуживания для приведения помещения камеры в безопасные для работы оператора условия.

Для включения и выключения подачи воды паряду с гидравлически управляемыми клапанами применяют задвижки с электрифицированным приводом. Анализ работы контрольно-пусковых узлов с электрифицированными задвижками показывает на частые случаи отказа электрифицированной задвижки. Причиной отказов является заклинивание системы электропривода. Некоторые проектные организации проектируют контрольно-пусковой узел с двумя электрифицированными задвижками, рабочей и резервной. Кроме того, предусмотрены дополнительно три задвижки с ручным приводом на случай отказа в работе резервной задвижки с электрифицированным приводом. Успех решения задачи совершенствования конструкции контрольно-пускового узла и ее практическая ценность зависят в значительной степени от правильности и глубины обоснования принципов построения системы, отвечающей устойчивостью к воздействию указанных выше факторов и основных технологических ситуаций, приводящих к предаварийным или аварийным состояниям элементов устройства. В результате научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проведенных под руководством автора, была пред-

ложена новая высокоэффективная структура противопожарного водоснабжения товарно-сырьевой базы и аналогичных ей объектов народного хозяйства.

### **Новая система противопожарного водоснабжения товарно-сырьевой базы**

Система противопожарного водоснабжения предназначена для подачи воды в передвижную пожарную технику, устройства водоорошения поверхности резервуаров с нефтью (продуктами переработки нефти) и стационарные установки пенотушителя в резервуарах. В состав системы входят следующие сооружения и оборудование (рис. 100):

сооружения для хранения расчетного запаса воды (резервуары чистой воды);

водопитатель для подачи расчетного расхода воды под требуемым напором (насосная станция с автоматизированным запуском насосно-силовых агрегатов — основной водопитатель; гидропневматический аккумулятор — автоматический водопитатель; гидроэлектроавтоматика запуска насосных агрегатов и включения резервных агрегатов при авариях);

водопроводная сеть для транспортирования и подачи требуемого расхода воды к потребителям с расположенными на ней водопроводными колодцами (с задвижками для выключения аварийных и ремонтных участков сети), пожарных подземных гидрантов (для отбора воды из водопровода передвижной пожарной техникой) и пунктов управления (с контрольно-пусковыми узлами для включения и выключения подачи воды в устройства водоорошения и стационарные установки пенотушения), а также устройствами для дозирования требуемой концентрации пенообразователя в поток воды;

пневмогидроавтоматика для включения системы в работу при возникновении пожара или при профилактических осмотрах и испытаниях работоспособности элементов и системы в целом.

Работа системы противопожарного водоснабжения характеризуется своеобразными случайными процессами, связанными с переходами этой системы из одного состояния в другие: подача заданного расхода воды потребителю (передвижной пожарной технике, устройству водоорошения, стационарной установке пенотушения при

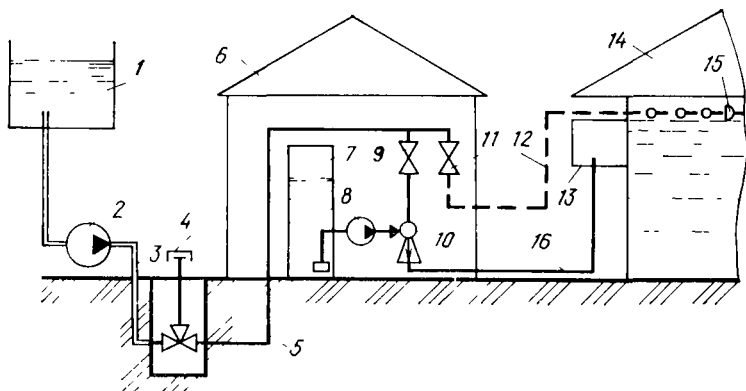


Рис. 100 Новая система противопожарного водоснабжения товарно-сырьевой базы нефтеперерабатывающего завода

1 — резервуар с водой 2 — насосно-силовое оборудование для подачи воды 3 — противопожарный водопровод 4 — пожарный гидрант 5 — водопроводная сеть 6 — наземное помещение 7 — емкость для хранения пенообразователя 8 — насос-дозатор пенообразователя 9 — контрольно-пусковой узел для подачи воды в установку пенотушения 10 — пеносмеситель 11 — контрольно-пусковой узел для подачи воды в устройство водоорошения 12 — сухотрубопровод для подачи воды; 13 — стационарный пеногенератор 14 — резервуар с нефтью (нефтепродуктом); 15 — устройство водоорошения 16 — сухотрубопровод для подачи водного раствора пенообразователя

ликвидировании пожара в течение определенного времени), а затем восстановление израсходованного запаса воды и приведение системы в состояние готовности (ожидание перед очередным включением в работу). В состоянии ожидания система подачи и распределения воды находится под дежурным напором воды, создаваемым автоматическим водопитателем. «Дежурный» напор воды в водопроводной сети (на входе в пожарные гидранты и контрольно-пусковые узлы стационарных установок водопенного пожаротушения) принят из условия качественной эксплуатации и надежной работы системы и составляет четвертую часть от рабочего напора в системе, создаваемого основным водопитателем в режиме подачи воды для тушения пожара. Основной водопитатель включается системой пневмогидроавтоматики по импульсу резкого падения давления, возникающего при включении пожарного гидранта или срабатывании контрольно-пускового узла. Импульс о срабатывании контрольно-пускового узла подается либо пожарным извещателем, либо оператором из диспетчерского пункта. Сигнал о включении основного водопитателя, характеризующего нача-

Таблица 32. Параметры показателя качества функционирования водопитателей

Параметр	Значения параметров варианта		Отношение показателя нового варианта к показателю базового	Относительный показатель $\Phi_i$
	базового	нового		
$Q$	0,94	1	1,06	0,38
$H$	0,94	1	1,06	0,212
$\tau$	1	0,5	2	0,2
$N$	1	0,9	1,12	0,112
$P$	0,98	0,99	1,02	0,202
$\Xi$	1	0,7	1,42	0,143

ло режима подачи воды при тушении пожара, поступает в пожарную часть и на заводской центральный диспетчерский пункт. Подача требуемой концентрации пенообразователя в поток воды производится дозаторами пенообразователя, которые подают пенообразователь в водопроводную сеть (в точке подключения контрольно-пускового узла установки пенотушения). В результате исследований произведена оценка эффективности вариантов новой и базовой системы водоснабжения для каждого из основных элементов системы противопожарного водоснабжения. Для оценки показателя качества функционирования водопитателя приняты следующие параметры: подача  $Q$ , л·с<sup>-1</sup>; напор  $H$ , м; инерционность включения  $\tau$ , с; установочная мощность  $N$ , кВт; надежность  $P$ ; трудоемкость технического обслуживания,  $\Xi$ . Весомость (ранг) каждого из параметров, полученная в результате опроса мнений экспертов, приведена ниже.

Параметры $i$ . . . . .	$Q$	$H$	$\tau$	$N$	$P$	$\Xi$
Весомость $\frac{1}{j}$ . . . . .	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1

Результаты оценки показателя качества функционирования водопитателей приведены в табл. 32.

Как видно из данных табл. 32, показатель качества функционирования нового варианта решения на 25 % выше показателя качества функционирования водопитателя базового варианта. Капитальные вложения для сооружения водопитателя по цовому варианту решения удалось сократить на 21,8 % за счет снижения объема строительных работ на возведение здания. Таким обра-

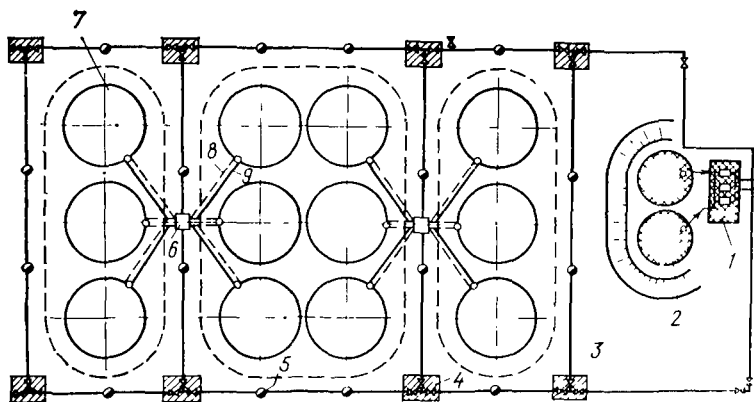


Рис 101 Схема трассировки водопроводной сети противопожарного водоснабжения резервуарного парка товарно сырьевой базы 1 — насосная станция; 2 — резервуары с водой, 3 — водопроводная сеть, 4 — колодец с задвижками, 5 — пожарный гидрант, 6 — наземный пункт управления (для размещения узлов управления и насосов дозаторов пенообразователя), 7 — резервуар с нефтепродуктами; 8—9 — сухотрубопроводы для подачи воды и водного раствора пенообразователя

зом, эффективность нового варианта решения ( $1,25 : 0,782 = 1,58$ ) повысилась на 58 %. Проведенный анализ показывает, что эффективность работы водопитателя может быть достигнута в результате:

увеличения подачи водопитателя за счет исключения системы дозирования пенообразователя, для функционирования которой затрачивается 6 % расхода подаваемой насосами воды;

увеличения напора воды на 6 % при замене двух параллельно работающих насосных агрегатов одним;

снижения продолжительности запуска электродвигателей в 2 раза при замене двух рабочих агрегатов на один;

повышения вероятности безотказной работы насосного агрегата за счет сокращения числа рабочих агрегатов и увеличения кратности резервирования с 1 до 2;

снижения трудоемкости затрат на техническое обслуживание (число насосно-силовых агрегатов уменьшено в 3 раза);

уменьшения установочной мощности агрегатов (коэффициент полезного действия одного агрегата выше коэффициента полезного действия двух агрегатов, имеющих подачу одного агрегата).

Т а б л и ц а 33. Параметры показателя качества функционирования водопроводной сети

Параметр	Размерность	Область изменения параметра	Весомость
Пропускная способность $Q$	л/с	20—500	0,3
Превышение давления выше рабочего $\Delta H$	МПа	0,02—0,1	0,1
Утечки через неплотности соединений труб и запорной арматуры $\Delta q$	л/сут	20—130	0,1
Вероятность отказа $\epsilon$	—	0,001—0,1	0,3
Срок службы $T$	лет	15—30	0,1
Техническое обслуживание $\Xi$	чел.-сут	2—10	0,1

Схема трассировки водопроводной сети нового варианта системы противопожарного завода приведена на рис. 101. Вариант трассировки водопроводной сети построен на основе учета влияния факторов, характеризующих качество функционирования водопроводной сети (табл. 33).

Пропускную способность водопроводных сетей определяет диаметр их труб. От того, насколько правильно определены диаметры, зависит эффективность технического решения, поскольку на долю водопроводных сетей приходится свыше 60 % капитальных вложений на систему противопожарной защиты.

В основу трассировки водопроводной сети положены функциональные зависимости пропускной способности  $F(Q)$ , стоимости строительства  $\varphi(C)$  и удельного сопротивления  $\psi(A)$  от диаметра трубопровода (рис. 102). Кривая  $D=F(Q)$  показывает, что при увеличении диаметра в 2 раза ( $D_2/D_1=2$ ) расход воды, подаваемой через водопровод (при прочих равных условиях  $L_1=L_2$  и  $A_1=A_2$ ), увеличивается в 6 раз ( $Q_2^2/Q_1^2=2^{5,3}=6$ ). Из кривых  $D=F(Q)$  и  $D=\varphi(C)$  видно, что трубы большого диаметра обладают большой пропускной способностью на каждый затрачиваемый рубль и единицу веса металла. Таким образом, замена двух ниток водопроводной сети диаметром 250 мм (в базовом варианте) одной линией водопровода диаметром 400 мм (в новом варианте) увеличивает пропускную способность водопроводной

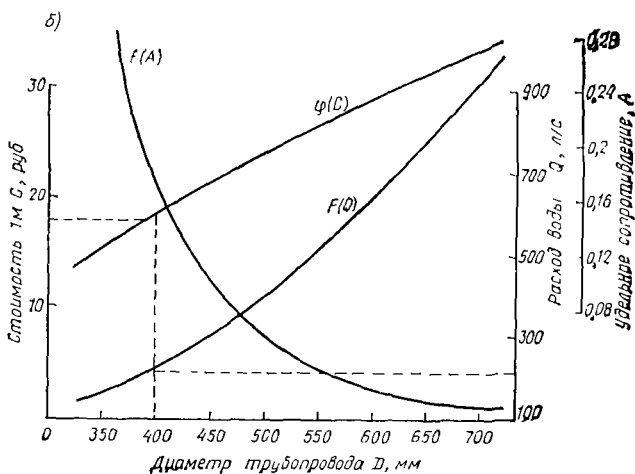
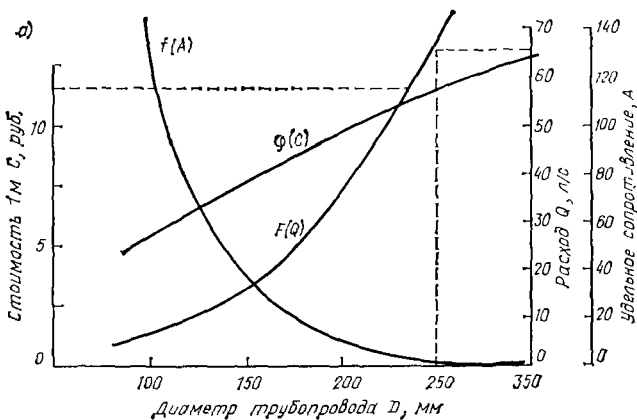


Рис. 102. Зависимость пропускной способности  $F(Q)$ , стоимости строительства  $\varphi(C)$  и удельного сопротивления  $\psi(A)$  от диаметра трубопровода  $D$

$a - D = 100 - 300$  мм;  $b - D = 350 - 700$  мм

сети на 60 % и сокращает затраты возведения водопроводной сети до 28 %.

Повышение давления в водопроводных сетях, возникающее при пуске и остановке насосно-силового оборудования, при включении и выключении арматуры и в ряде других причин приводит к разрушению водопроводных труб, нарушает герметичность их соединений и

Таблица 34. Показатели качества функционирования водопроводной сети

Параметр	Значение параметров варианта		Весомость	Отношение показателя нового варианта к показателю базового	Относительный показатель $\Phi_1$
	базового	нового			
Q	0,4	1	0,3	2,5	0,75
$\Delta H$	1	0,2	0,1	5	0,5
$\Delta q$	1	0,5	0,1	2	0,2
$\epsilon$	0,3	1	0,3	2,3	1
T	1	1,4	0,1	1,4	0,14
Э	0,6	1	0,1	1,7	0,17
$\Sigma \Phi_1 = 2,62$					

выводит из строя оборудование. Это нарушает нормальный режим функционирования водопроводной сети и зачастую приводит к отказам в работе отдельных ее участков.

Необходимость поддержания рабочего давления в водопроводной сети в режиме «ожидания» вызывает непроизводительные потери воды и пенообразователя в результате утечек. Утечки через неплотности соединений труб и запорной арматуры в базовом варианте решения составляют  $125 \text{ л} \cdot \text{сут}^{-1}$ . Для снижения размера утечек в новом варианте предложена низконапорная система водоподачи. В режиме ожидания система содержится под напором 20 м, достаточным для работы гидроавтоматики. Это позволяет сократить размер утечек более чем в 2 раза.

В результате рациональной трассировки надежность работы водопроводных сетей в новом варианте решения (по вероятности отказа) повышена более чем в 3 раза.

Срок службы водопроводной сети в новом варианте технического решения увеличен на 40 % в результате применения чугунных водопроводных труб, которые менее подвержены воздействию постоянного высокого давления, и исключения агрессивного воздействия на металл водного раствора пенообразователя. Результаты оценки размера прибыли показателя качества функционирования водопроводной сети по новому варианту приведены в табл. 34.

Таким образом, показатель качества функционирования предложенного варианта трассировки водопроводной сети в 2,62 раза выше показателя базового вариан-



Таблица 35. Показатели качества функционирования наземного пункта управления

Параметр	Значение параметров варианта		Весомость	Отношение показателя нового варианта к показателю базового	Относительный показатель $\Phi_j$
	базового	нового			
$\tau$	1	1	0,2	1	0,2
$P$	0,6	1	0,3	1,66	0,5
$\mathcal{E}$	1	0,3	0,2	3,33	0,66
$T$	0,5	0,7	0,15	1,4	0,21
$B$	1	0,4	0,15	2,5	0,37

та. Капитальные вложения на строительство водопроводной сети по новому варианту сокращены на 28 %. В связи с этим эффективность нового решения увеличилась в 3,75 раза.

Контрольно-пусковой узел для удобства технического обслуживания и эксплуатации в новом варианте решения расположен в наземном помещении (из строительных конструкций первой степени огнестойкости) — пункте управления. В помещении размещены шесть контрольно-пусковых узлов для включения подачи воды в устройства водоорошения и установки пенотушения и насос-дозатор пенообразователя с емкостью для хранения пенообразователя. Принятая компоновка оборудования обусловлена стремлением улучшить условия эксплуатации оборудования, а также необходимостью сокращения непроизводительных утечек пенообразователя, увеличения срока службы водопроводной сети и улучшения качества дозирования пенообразователя в поток воды.

Эффективность предлагаемого варианта решения оценивалась путем сравнения показателей качества базового и нового вариантов решения с учетом приведенных ниже показателей: инерционность включения  $\tau$ , с; надежность работы  $P$ ; трудоемкость технического обслуживания  $\mathcal{E}$ , чел.-сут<sup>-1</sup>; срок службы  $T$ , лет; безопасность работы операторов  $B$ , балл.

Результаты оценки размера прибыли показателя качества функционирования нового варианта решения приведены в табл. 35. Показатель качества функционирования  $\Sigma\Phi_j=1,94$ .

Таким образом, показатель качества функционирования нового варианта решения на 94 % выше показателя базового варианта. Капитальные вложения для возведения наземной постройки на 46 % ниже затрат на сооружения шести подземных камер для размещения контрольно-пусковых узлов. В результате эффективность нового варианта решения в 3,5 раза ( $1,94 : 0,54 = 3,5$ ) превышает эффективность базового варианта

Применение предложенного варианта узла управления позволяет:

повысить надежность работы за счет создания нормальных условий для качественного технического обслуживания и эксплуатации;

снизить затраты на техническое обслуживание;

увеличить срок службы запорно-пусковой арматуры (срок службы арматуры в отапливаемом помещении с нормальной влажностью окружающей среды в 2 раза выше срока службы арматуры, эксплуатируемой при пониженной температуре, повышенной влажности, а также под воздействием грунтовых вод и льдово-грунтовой среды);

уменьшить вероятность воздействия опасных факторов (ядовитых и взрывчатых паров) на жизнь обслуживающего персонала.

Эффективность новой схемы противопожарного водоснабжения в целом определена исходя из весомости каждого элемента системы, которая принята пропорционально капитальным вложениям в элемент. Эффективность новой схемы противопожарного водоснабжения ( $1,6 \times 0,3 + 3,75 \times 0,5 + 3,5 \times 0,2 = 3,05$ ) в 3,1 раза превышает эффективность базового варианта.

### **Противопожарное водоснабжение крупнотоннажных комплексов по переработке нефти**

Противопожарное водоснабжение крупнотоннажных технологических комплексов по переработке нефти содержит: помещение пожарной станции, в которой размещены две группы насосно-силового оборудования для подачи воды и водного раствора пенообразователя, две нитки водопроводной сети (для подачи воды и водного раствора пенообразователя), запорно-пусковую арматуру и контрольно-пусковые узлы, а также генераторы пены, расположенные в отдельных помещениях технологического комплекса. В пожарной насосной станции раз-

мещены автоматические дозаторы для подачи пенообразователя, емкость с пенообразователем и автоматика включения насосных агрегатов и аварийного переключения рабочих агрегатов на резервные. Система предназначена для бесперебойной подачи водного раствора пенообразователя и воды в стационарные лафетные стволы, устройства водоорошения колонн, а также в передвижную пожарную технику. Водопроводные сети имеют кольцевую разводку, выполненную из условия водообеспечения потребителей при авариях на участках сети. Для отбора воды передвижной пожарной техникой (при подаче средств тушения в переносные агрегаты) на водопроводной сети предусмотрены пожарные гидранты. Для включения подачи водного раствора пенообразователя в генераторы пены на сети водного раствора пенообразователя устроены пусковые узлы. Система работает таким образом, что при включении пожарного гидранта или пускового узла включаются насосно-силовые агрегаты насосной станции.

Требованиями противопожарных норм проектирования определены расходы воды, на подачу которых в течение нормативной продолжительности рассчитывают параметры водопроводных сооружений (емкостей для хранения воды, насосно-силовых агрегатов и т. п.).

Противопожарное водоснабжение технологических комплексов по переработке нефти в техническом отношении имеет различные элементы оборудования (дозаторы пенообразователя, запорно-пусковая арматура, автоматика включения и выключения подачи жидкости).

Причиной частых отказов работы задвижки с электрифицированным приводом является заклинивание системы электропривода, связанное с чрезмерным усилием для вращения шпинделя затвора, которое возникает при значительном перепаде рабочего давления. Из-за низкой надежности пусковой арматуры, эксплуатация которой недопустима в режиме регулирования подачи с перепадами давления, использовать подобную арматуру в установках пожаротушения нежелательно. Пусковые узлы проектируют с двумя электрифицированными задвижками (рабочей и резервной). Помимо этого, предусматривают дополнительно три задвижки с ручным приводом на случай отказа в работе резервной задвижки с электрифицированным приводом.

Для подачи воды и водного раствора пенообразователя используют системы подачи распределения воды. Наиболее типичны системы водораспределения по двум независимым линиям водопроводной сети, первая из которых предназначена для подачи воды, вторая — водного раствора пенообразователя. Водопроводные сети в режиме ожидания находятся под давлением 0,6 МПа. Утечки через неплотности соединений труб, арматуру и другое водопроводное оборудование ежегодно составляют свыше 700 м<sup>3</sup> воды и 40 м<sup>3</sup> пенообразователя. На восстановление рабочего давления жидкости в сети ежегодно расходуется 280 кВт·ч электроэнергии. Постоянная утечка пенообразователя с биологически жесткими компонентами пагубно воздействует на окружающую гидросферу. В пожарной насосной станции расположены две группы насосов: первая — для пенообразователя, вторая — для воды. В помещении насосной станции имеются емкости для хранения пенообразователя. Водный раствор пенообразователя получается с помощью эжекторов-смесителей за счет подачи воды насосами из противопожарного водопровода. Электрозадвижка на линии всасывания пенообразователя открывается одновременно с включением одной из электрозадвижек напорного коллектора. По достижении в коллекторе заданного предела давления автоматически открывается соответствующая электрозадвижка и раствор пенообразователя подается в заданное направление водопроводной сети. Открытые технологические насосные и другие объекты комплекса имеют оборудование для отбора жидкости из противопожарного водопровода и подачи ее в переносные пеногенераторы. У каждого объекта предусматривают не менее двух стояков для подключения пеногенераторов в каждом отсеке. При пожаре используют ближайшие к очагу пожара стояки для подключения переносных пеногенераторов. После открывания электрифицированной задвижки стояка запускается насос (от пусковых кнопок, расположенных у каждого стояка). Подача водного раствора пенообразователя прекращается при выключении электродвигателя или закрытии электрозадвижки. При опорожнении емкостей насос останавливается автоматически от импульса датчика уровня. Помимо автоматического запуска насосно-силовых агрегатов в насосной предусматриваются: пуск и выключение насоса при нажатии кнопки на объекте или со щита операторной;

открывание и закрытие электрозадвижки на месте и со щита операторной; переключение рабочего насоса на резервный при падении давления ниже расчетного; переключение рабочего насоса на резервный при отсутствии расчетной величины давления в течение 1 мин.

Для тушения пожаров и охлаждения водой технологических аппаратов и этажерок на пожарном водопроводе предусмотрены лафетные установки, представляющие собой стационарно установленные пожарные лафетные стволы. Лафетный ствол оборудован сухотрубом с соединительной головкой диаметром 80 мм на высоте 1,3 м от уровня земли (для присоединения к ним рукавных линий от насосов пожарных автомобилей). Радиус действия струй из лафетных стволов, их число и расположение определяются условиями орошения каждой точки защищаемого объекта двумя струями. Лафетные стволы обеспечивают маневрирование водяной струей в горизонтальной плоскости в пределах  $360^\circ$  и в вертикальной плоскости в пределах от  $-30$  до  $+75^\circ$ . Лафетным стволом управляет оператор вручную. На ответвлении от водопроводной сети к лафетному стволу в колодцах установлены две задвижки: одна в начале ответвления, другая — у лафетного ствола. Задвижки в колодцах и на ответвлениях к лафетным стволам имеют ручной или дистанционный привод. Задвижка с ручным (местным) приводом размещается на расстоянии не более 20 м от лафетного ствола; при этом штурвал задвижки выводится над крышкой люка колодцев. При большем расстоянии задвижек от лафетных стволов применяют дистанционный привод от кнопочного пускателя, который располагается у лафетного ствола или у основания лафетной вышки. При этом электропривод задвижки устанавливают на покрытии колодца. Электропривод задвижки дублируется ручным приводом. Задвижка в колодце в начале ответвления в теплое время года находится в положении «Открыто». Участок трубопровода между лафетным стволом и задвижкой в колодце в холодное время года освобождается от воды.

На технологических установках не всегда удается оборудовать колонные аппараты такими лафетными стволами, которые смогли бы орошать каждую точку защищаемого аппарата, поэтому дополнительно к лафетным стволам устраивают оборудование водяного орошения. Существуют два варианта:

водяное оросительное оборудование, защищающее колонные аппараты на отметке выше 30 м, и лафетные стволы, струи от которых защищают любую точку колонных аппаратов на отметках до 30 м;

водяное оросительное оборудование для противопожарной защиты колонных аппаратов с отметки 12 м до верха аппарата.

Оборудование водяного орошения представляет собой кольца перфорированных трубопроводов на отметке 30 м и выше до верха аппарата. Если колонные аппараты защищены лафетными стволами не менее чем с двух противоположных сторон, то кольца орошения располагают с отметки 12 м и до верха аппарата. Оборудование водяного орошения колонного аппарата включает:

оросительные кольцевые трубопроводы, расположенные под площадками колонных аппаратов с шагом 8 м один от другого по высоте аппарата и на расстоянии 0,8 м от его стенки (изоляции). Верхнее кольцо располагается над колонным аппаратом;

стояк для подачи воды в кольцо орошения, проложенный вдоль колонного аппарата от верха колонны до ввода противоположного водопровода;

насосы-повысители напора воды.

Кольца орошения располагают так, чтобы струи воды из них были направлены вниз под углом  $50-60^\circ$  к орошаемой поверхности колонны. Из-за возможного засорения перфорационных отверстий на кольцах орошения устанавливают дренчеры ДЛ. Для обеспечения необходимого расхода воды и одинакового напора во всех кольцах орошения, расположенных на разных высотах колонных аппаратов, на трубопроводах установлены ограничительные диафрагмы.

Водопроводную сеть для подачи воды в оросительную систему аппаратов рассчитывают из условия одновременного включения горящего колонного аппарата и двух соседних с ним. Водоорошение включают вручную. Штурвалы задвижек на подводящем трубопроводе к стоякам выводят наружу над покрытием колодцев. Подводящие трубопроводы к оборудованию водоорошения в теплое время года заполнены водой. Система противопожарного водоснабжения подает воду в установку автоматического пенного пожаротушения, которая предназначена для автоматического обнаружения и ликвидации пожара, включения насосов-повысителей, открывания соответ-

вующих электрифицированных задвижек для подачи жидкости в защищаемое помещение. Установка имеет оборудование для оптического и акустического извещения о месте возникновения очага пожара и для наблюдения за состоянием объектов управления. Установками автоматического пенного пожаротушением оборудуют закрытые взрыво-, пожароопасные помещения, в которых устанавливают пожарные извещатели, а также открытые объекты, вблизи которых размещаются извещатели-кнопки для ручного пуска насосов водного раствора пенообразователя и включения сигнала о пожаре.

Пункт управления автоматическими установками пенотушения размещен в помещении операторной. Там же расположены приборы приема сигналов о пожаре от автоматических и ручных извещателей со звуковой и световой индикацией, релейные щиты, щиты автоматики и сигнализации с пневмосхемой и пульт управления.

Кроме автоматического управления, предусмотрено ручное управление насосами и задвижками на растворопроводах и дистанционное управление с пульта оператора и от кнопок, установленных в насосной пенотушения и у задвижек. Пункт автоматического управления установками пенотушением включает концентратор малой емкости «Сигнал-12» (или ему подобный); релейные щиты; щит световой сигнализации (мнемонит); пульт управления.

Концентратор малой емкости «Сигнал-12» предназначен для приема сигналов о пожаре с автоматических и ручных пожарных извещателей, а также преобразования слаботочного сигнала для подачи его на релейный щит управления в операторной. Концентратор выдает световую и звуковую сигнализации с указанием места возникновения очага пожара. На релейном щите операторной установлена релейная аппаратура для усиления сигналов от слаботочной первичной аппаратуры приборов регистрации уровня давления, выдержки времени. Там же расположены вспомогательные реле для автоматического включения резервного насоса при отключении рабочего. На пульте в операторной имеются кнопки дистанционного управления насосами и задвижками, переключатели выбора режимов управления — «Дистанционное — Автоматическое» или «Местное» и выбора рабочего или резервного агрегата. Щит световой сигнализации служит для визуального наблюдения за работой си-

стемы автоматического управления пенотушением. На мнемощит выведены световые указатели: насосы «Включены», «Выключены»; насосы «Основной», «Резервный»; неисправность насосов, предупредительные сигналы о снижении уровня в емкостях с раствором пенообразователя ниже допустимого предела, и снижении давления в сети растворопровода ниже расчетного, а также положение электропривода каждой из задвижек. На мнемосхеме установлено световое табло, характеризующее состояние насосных агрегатов «Включен», «Отключен», положение задвижек — «Открыто», «Закрыто», «Заклинило», а также аварийная сигнализация о нарушении нормальной работы насосов, о пожаре, падении уровня в емкостях с раствором и проверки ламп и звукового сигнала.

При возникновении пожара сигнал от автоматических или ручных извещателей поступает по кабельным линиям в операторную на концентратор малой емкости «Сигнал-12», который подает световую и звуковую сигнализации с расшифровкой объекта, загорания и одновременно формирует общий и индивидуальный сигнал тревоги. Общий сигнал о пожаре на установке транслируется в пожарное депо завода, на центральную станцию пожарной сигнализации, где сигнал дублируется световой и звуковой сигнализациями. Индивидуальный сигнал о возникновении очага пожара с концентратора поступает на релейный щит в операторной для формирования сигналов управления системой автоматического пенотушения и подачи команды на включение рабочего насоса пенотушения.

### **Автоматизированная система противопожарного водоснабжения нефтеперерабатывающей установки ЭЛОУ-АВТ**

Система подачи и распределения воды в установки пожаротушения технологического комплекса ЭЛОУ-АВТ нефтеперерабатывающего завода выполняет функции подачи воды в передвижную пожарную технику, водообеспечения стационарных установок водопенного тушения пожаров и устройств водоорошения колонн. Система (рис. 103) представляет собой комплекс сооружений: пожарная насосная станция, магистральные сухотрубы установки пожаротушения и т. п.



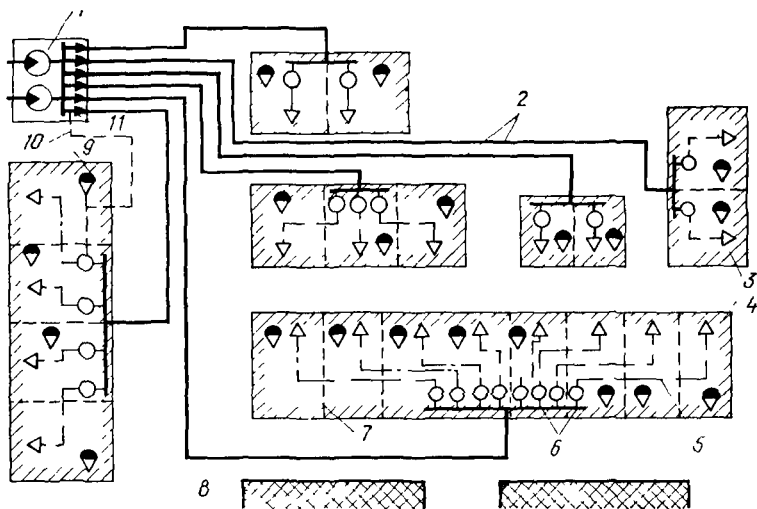


Рис 103. Схема автоматизированной системы противопожарного водоснабжения нефтеперерабатывающего комплекса

1 — насосная пожарная станция, 2 — магистральные сухотрубы 3 — секция автоматической установки пенного пожаротушения, 4 — здание, оборудованное установкой пожаротушения, 5 — распределительная сеть установки пожаротушения, 6 — контрольно-пусковой узел установки пожаротушения, 7 — граница между секциями установки пожаротушения, 8 — здание, не оборудованное установкой пожаротушения; 9 — пожарный извещатель 10 — линия связи пожарной сигнализации; 11 — пусковые узлы

Компоновка оборудования новой установки противопожарного водоснабжения обусловлена стремлением повысить эффективность пожаротушения, улучшить условия эксплуатации, рационализировать трассировку водопроводной сети, сократить непроизводительные утечки пенообразователя, увеличить срок службы и улучшить качество получаемой пены.

В новом техническом решении увеличена мощность насосно-силового оборудования с 80 до 350 кВт. В результате этого существенно возросли производительность насосно-силового оборудования (с 24 до 150 л/с) и технические возможности установки пожаротушения. Новая система в отличие от базовой способна автоматически ликвидировать крупный очаг пожара (площадью свыше 100 м<sup>2</sup>). Применение в новом решении оборудования для автоматической подачи и распределения пены в очаг пожара позволило сократить инерционность установки пожаротушения  $\tau_{и}$  с 7 мин (420 с) до 40 с.

В базовом варианте для приведения в действие установки пожаротушения затрачивается время: на оповещение о пожаре — 1 мин; следование пожарной команды к месту пожара — 5 мин; развертывание и включение установки пожаротушения — 1 мин. В новом варианте решения приведение установки в действие — автоматическое (40 с); инерционность извещателя (спринклера) — 10 с; продолжительность заполнения сухотруба длиной 220 м, диаметром 150 мм — 30 с. Продолжительность тушения пожара  $\tau_t$  в базовом варианте составляет 50 мин, в автоматическом режиме пожаротушения — 10 мин.

Надежность работы установки пожаротушения повышена в результате использования наземной трассировки распределительных трубопроводов. Продолжительность восстановления наземного трубопровода после его аварии по сравнению с подземным размещением в базовом варианте сокращена с 24 до 3 ч. Наземное размещение сухотрубов в системе подачи и распределения позволило освободиться от дорогостоящей и опасной операции технического обслуживания оборудования и арматуры, располагаемой в подземных колодцах и камерах (базовый вариант), постоянно заполненных парогазовоздушной смесью нефтепродуктов. В новом варианте решения применена система подачи и распределения воды с сухотрубами. Это полностью исключает утечки жидкости через неплотности соединений, а также потери дефицитного пенообразователя. Вместе с этим исключается пагубное воздействие биологически «жестких» компонентов пенообразователя на окружающую гидросферу. Слагаемые приведенных затрат включают трудоемкость технического обслуживания Э; капитальные вложения К; ущерб от пожара и его последствия У, учитывающие простой технологического комплекса в результате нарушений, вызванных воздействием факторов пожара. Трудоемкость технического обслуживания в новом варианте сокращается в результате использования наземной системы распределительных трубопроводов. Капитальные вложения при сооружении установок автоматического пожаротушения (новый вариант) возрастают в результате увеличения установочной мощности насосно-силового оборудования, увеличения диаметров распределительных трубопроводов, применения системы автоматики включения подачи жидкости.

Результаты оценки размера прибыли показателя качества функционирования нового варианта технического решения по стандартной методике приведены в табл. 36—37. Данные таблиц показывают, что показатель качества функционирования нового варианта решения в 5,6 раза выше показателя базового варианта.

Таблица 36. Слагаемые показатели качества функционирования системы

Параметры	Значения параметров варианта		$x_i/x_i^*$	$m_i x_i/x_i^* = \varphi_i^*$
	$x_i$ базового	$x_i^*$ нового		
$N$ , кВт	80	350	0,229	0,0229
$\tau_n$ , с	420	40	10,5	3,15
$\tau_{т_1}$ , ч	1	0,17	6	1,2
$T$	12	12	1	0,1
$B$	1	0,15	8	1
$B$	1	0,5	2	0,1
			$\Sigma \varphi_i^* = 5,6$	

Таблица 37. Слагаемые приведенных затрат

Слагаемые, тыс. руб/год	Значения слагаемых варианта	
	базового $\Pi_j$	нового $\Pi_j^*$
$I$	9,61	6,71
$K$	46,82	89,16
$У$	138,2	25,8
	$\Sigma \Pi_j = 149,6$	$\Sigma \Pi_j^* = 121,7$

### Противопожарное водоснабжение на складах лесоматериалов

На складах лесоматериалов применяют противопожарные водопроводы с лафетными стволами, которые рассчитывают на подачу расходов воды, приведенных ниже.

Склад	Расход воды, л/с
Пиломатериалов при площади, равной:	
до 9 га . . . . .	65
более 9 » . . . . .	130
Круглых лесоматериалов:	
при влажном способе хранения . . . . .	30
» сухом способе хранения и площади до 9 га . . . . .	30
то же, и более 9 до 18 га . . . . .	45
Балансовой древесины, осмола и дров кучевого хранения при высоте куч:	
до 14 м . . . . .	60
более 14 » . . . . .	240
Щепы и опилок . . . . .	60

Особенности размещения пиломатериалов на подобных предприятиях осложняют пожаротушение и делают практически невозможным применение переносного оборудования пожарных подразделений. Пожары на объектах характеризуются крупными размерами и быстрым распространением огня.

Противопожарные водопроводы на складах лесоматериалов, как правило, устраивают по системе высокого давления. В водопроводе повышенное давление воды требуется в период пожаротушения, в остальное время в нем поддерживается низкое давление. Водопроводы постоянного высокого давления устраивают в особых случаях, так как эксплуатация этих систем требует значительных затрат электроэнергии и связана с большими потерями воды из-за ее утечки через неплотности соединений труб и установленную на водопроводной сети арматуру. В результате резкого изменения давления и подачи больших расходов воды в трубах и арматуре возникают гидравлические удары и кавитационные процессы, которые являются причинами отказов водопроводной сети, приводящих к снижению надежности всей системы. Основной мерой по обеспечению надежности подачи воды является устройство кольцевой водопроводной сети. Для водопроводных линий применяют трубы, способные выдерживать значительные внутренние давления и внешние динамические нагрузки.

Лафетные стволы на водопроводной сети размещают так, чтобы обеспечить орошение водой расчетной точки защищаемого объекта не менее чем двумя компактными струями. Задвижки на водопроводной сети устанавливаются таким образом, чтобы в случае неисправности на

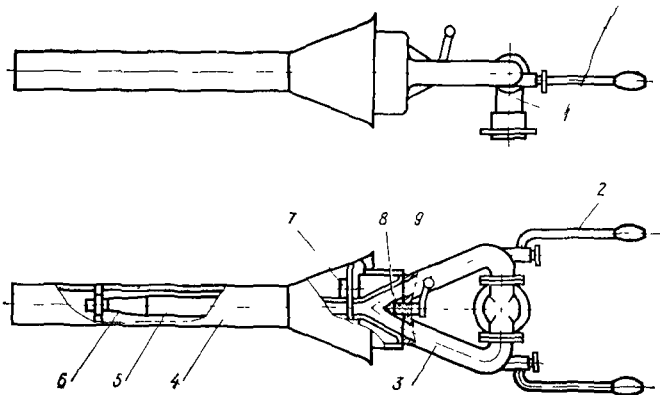


Рис. 104. Ствол пожарный лафетный комбинированный

1 — опора, 2 — рукоятка управления стволом, 3 — разветвление, 4 — патрубок для формирования пенной струи; 5 — водяной ствол, 6 — насадок 7 — распылитель, 8 — золотник; 9 — рукоятка переключения режима работы

участке водопровода одновременно выключалось не более двух лафетных стволов. Подача воды к лафетным стволам и гидрантам может осуществляться стационарными насосами водосточников или резервуаров без предварительной очистки. Мощность насосной станции для противопожарного водопровода склада балансовой древесины рассчитывают на одновременную работу четырех лафетных стволов с общим расходом воды около 240 л/с. Лафетные стволы на водопроводах высокого давления устанавливают на отметке поверхности земли открытых площадок, на покрытиях вспомогательных и производственных зданий, а также на специальных вышках. Размещение стволов на возвышении обеспечивает лучшие условия орошения объекта водой, позволяет уменьшить ее расход и напор у стволов. Диаметр насадков стационарных лафетных стволов принимают 38 или 50 мм; на паружных установках промышленных предприятий можно устанавливать лафетные стволы с диаметром насадка не менее 28 мм. Ствол пожарный лафетный комбинированный (рис. 104) предназначен для формирования и управления водяными пенными струями. Он состоит из приемного корпуса и разветвления с патрубком, на который навертывают насадок. На патрубке установлен распылитель для тепловой защиты, который создает водяную завесу в виде веера. Разветвление шарнирно закреплено на опоре, которая имеет опорный фланец для подключения ствола к стояку про-

Таблица 38. Расход воды и радиус действия струй, получаемых из лафетных стволов

Диаметр насадки, мм	Напор ствола, м	Расход воды, л/с	Радиус струи, м	
			$R_k$	$R_p$
28	40	17,2	30	50
	50	19,3	32	55
	70	22,8	36	65
	90	25,9	38	72
32	40	22,5	30,5	53
	50	25,1	34	58
	70	29,6	38	68
	90	33,8	40	75
38	40	31,7	32	57
	50	35,4	35,5	62
	70	41,9	39,5	72
	90	47,6	43	80
50	40	55	33	60
	50	61,4	37,5	65
	70	72,6	42,5	75
	90	82,5	46	85
65	40	88	35	62
	50	98,5	42	70
	70	116,5	52	90
	90	134	59	108

тивопожарного водопровода. Шарнирные соединения позволяют поворачивать ствол рукояткой в горизонтальной плоскости на  $360^\circ$  и в вертикальной от  $-30$  до  $+75^\circ$ . Ствол комплектуют сменным воздушно-пенным патрубком, обеспечивающим формирование воздушно-пенной струи и всасывающим рукавом для подсосывания пенообразователя. При включении подачи водного раствора пенообразователя ствол обеспечивает получение пенной струи. Длина пенной струи при одном и том же давлении у ствола на 15—20 % меньше, чем длина сплошной водяной струи. Зависимость расхода воды, радиуса действия компактной части  $R_k$  и всей струи  $R_p$  (включая раздробленную часть) от напора приведена в табл. 38.

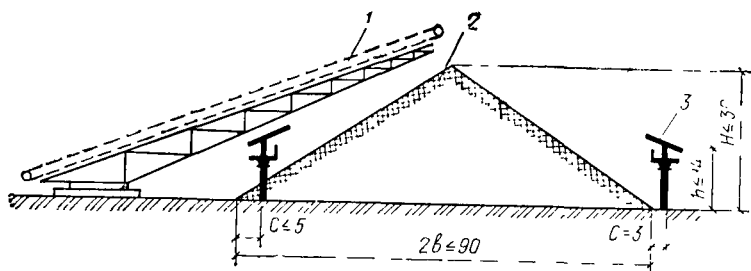


Рис. 105. Схема размещения стволов для тушения пожаров балансовой древесины, расположенной в куче

1 — транспортер для складирования древесины; 2 — куча древесины, 3 — лафетный ствол

Лафетные стволы на наружных установках и открытых площадках нефтехимической промышленности располагают у пристроенных и отдельно стоящих установок с таким расчетом, чтобы обеспечить орошение каждой точки наружной установки компактной струей. Орошение колонной аппаратуры выше отметок этажерок необходимо осуществить стационарным оборудованием водяного орошения, представляющим собой кольца с установленными на них оросителями (обычно дренчерами лопаточного типа).

На сырьевых, товарных и промежуточных складах лафетные стволы располагают за обваловкой. Число лафетных стволов на складах принимают исходя из условия орошения каждого резервуара двумя струями. При оборудовании резервуаров стационарной системой орошения с применением специальных водяных распылителей или перфорированных трубопроводов лафетные стволы располагают из расчета подачи одной струи на каждый резервуар.

Пример расстановки лафетных стволов показан для противопожарного водоснабжения склада лесоматериалов в виде кучи балансовой древесины. При расположении стволов необходимо исходить из того, что компактные водяные струи с каждой стороны кучи должны достигать ее гребня. Когда высота кучи равна 30 м, а ширина основания 90 м, требуемое орошение достигается из насадков диаметром 50—65 мм и напоре 100 м. Лафетные вышки располагают со стороны кучеукладчика не более чем 5 м от края, а с другой стороны — вне кучи, на расстоянии 3 м от края ее основания (рис. 105). Максимальная высота вышек 14 м. Расстановка лафетных стволов по периметру кучи осуществляется из

условия орошения каждой точки поверхности кучи двумя струями. В этом случае наиболее удаленная и высоко расположенная точка для определения места соприкосновения струй от двух смежных стволов, находится на гребне кучи. Стволы с насадками диаметром 50 мм при напоре ствола 70 м подают 72,6 л/с воды и имеют радиус действия компактной струи 43 м. Проекцию компактной струи находят по формуле

$$R_{\text{п}}^2 = R_{\text{к}}^2 - (H - h)^2 = 40,5 \text{ м},$$

где  $R_{\text{к}}$  — радиус компактной части струи,  $H$  — высота гребня кучи;  $h$  — высота расположения ствола.

Расстояние между смежными лафетными стволами (расположенными вне кучи) определяют по формуле

$$a = \sqrt{R_{\text{п}}^2 - (b + c)^2} = 13,8 \text{ м},$$

где  $b + c$  — расстояние от оси ствола до оси кучи;  $c$  — расстояние от оси ствола до края кучи.

Расчет орошения поверхности кучи компактными струями длиной 59 м, получаемыми при напоре 90 м из стволов с насадком 65 мм, показывает, что расстояние между лафетными стволами, расположенными вне кучи, можно будет увеличить до 43,5 м, а расстояние между стволами со стороны кучеукладчика — до 49 м. Такое решение является наиболее целесообразным по экономическим соображениям. С учетом найденных расстояний между стволами определяют места расположения лафетных вышек путем построения траекторий и зон орошения компактными струями. В практике может встретиться противоположная задача — определить число стволов, если известно расстояние между ними. Для определения участков поверхности кучи, орошаемых одной, двумя и более струями, вычерчивают план орошения. При этом необходимо определить также мертвую зону непосредственно у вышки, которая из-за ограничения поворота ствола в вертикальной плоскости орошается струями смежных стволов. Для тушения пожара в этой зоне предусматривается специальный стояк с соединительными головками для подсоединения рукавов с ручными стволами.

На рис 106 показана вышка, в которой в качестве несущей конструкции использован стояк стальной трубы, подающей воду к стволу. У основания вышки устраивают водопроводный колодец, в котором ниже глубины промерзания грунта устаивают задвижку. Штурвал управления задвижкой выводят на поверхность земли. В колодце на стояке ниже глубины промерзания грунта имеется клапан для слива воды в канализацию. В сухих водопроницаемых грунтах вода сливается в грунт. На уровне поверхности земли на стояке имеется



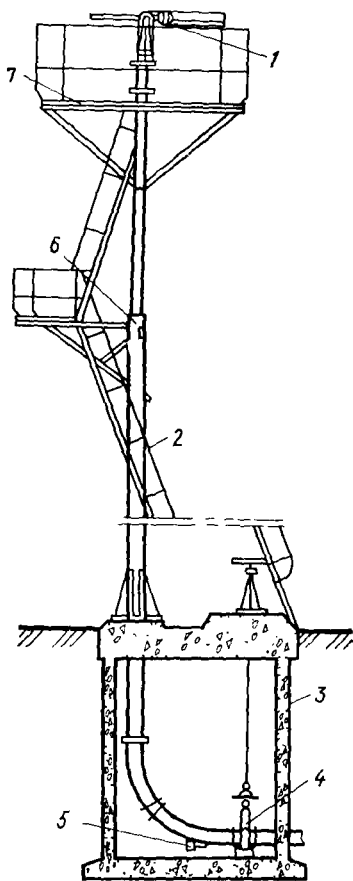


Рис. 106 Стальная вышка для лафетного ствола

1 — лафетный ствол; 2 — лестница, 3 — водопроводный колодец; 4 — задвижка, 5 — кран для слива оставшейся воды, 6 — стояк, 7 — площадка

контрольно-спускной кран диаметром 50 мм, который служит для проверки работы задвижки и сливного клапана. Для защиты ствольщика от теплового излучения на площадке установлен щит. Вышка из сборного железобетона наиболее надежна и устойчива к динамическим и тепловым воздействиям. Примеры размещения лафетных стволов на водопроводах производственных объектов, а также варианты подключения лафетных стволов, установленных на открытой площадке и покрытии здания, показаны на рис. 107. При установке лафетных стволов на вышках, покрытиях зданий или площадках наружных маршевых лестниц без стационарного подключения к водопроводной сети к лафетным стволам должны быть подведены сухотрубы с соединительными головками для подсоединения рукавных линий от пожарных автомашин. Подсоединение сухотрубов к лафетным стволам должно быть стационарным.

Высоту вышек противопожарного водоснабжения технологических установок принимают равной 4,8; 6 и 7,2 м. Для защиты сырьевых и товарных складов с шаровыми резервуарами высота вышек принимается не менее 5 м, а для защиты горизонтальных резервуаров — не менее 2 м, считая от планировочной отметки территории склада до уровня рабочей площадки вышки.

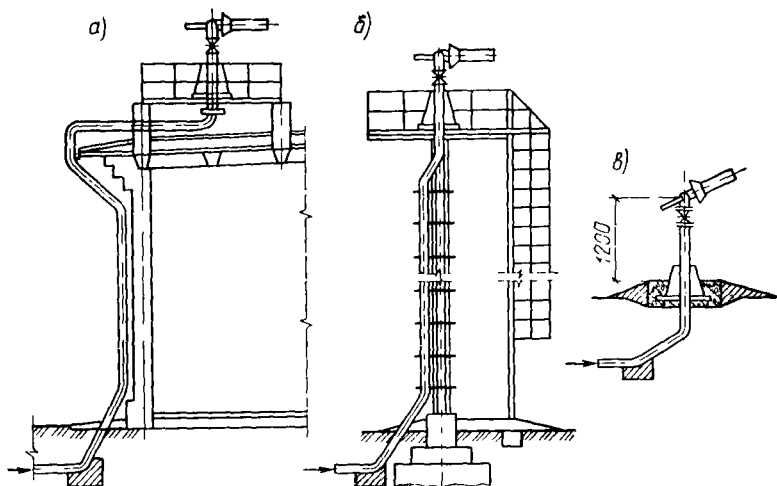


Рис. 107. Установка лафетного ствола

а — на покрытии здания, б — на вышке, в — на открытой площадке

## 9. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОТБОРА ВОДЫ ИЗ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ВОДОПРОВОДОВ

Пожарные подземные гидранты устанавливают в водопроводных колодцах, необходимость сооружения которых существенно удорожает строительство водопроводных сетей. Новая конструкция устройства для отбора воды из коммунальных и промышленных водопроводов показана на рис. 108. В основу конструкции положен бесколодезный гидрант. Новое устройство может быть применено в качестве наземного пожарного гидранта, предназначенного для подачи воды из водопровода в передвижную пожарную технику, а также в качестве контрольно-пускового узла (КПУ) для автоматического включения стационарных установок водопенного пожаротушения. В последнем случае устройство оборудуется электрифицированным приводом ЭВ-25М (ВАОА-12-4). Новое устройство имеет ряд преимуществ перед пожарным подземным гидрантом (ГОСТ 8220—62), особенно при строительстве коммунальных водопроводов, трасса которых проходит в стороне от магистралей с интенсивным движением транспорта.

## Техническая характеристика устройства для отбора воды из подземных водопроводов

Номинальная производительность (при потерях напора 10 м), л·с <sup>-1</sup> . . . . .	70
Время приведения в действие, не более, с . . . . .	15
Повышение давления при гидравлическом ударе, не более (в долях $P_0$ ) . . . . .	0,3
Крутящий момент, Н·м . . . . .	150
Условное давление, МПа . . . . .	1
Условный проход, мм . . . . .	125
Высота гидранта (глубина заложения водопровода) $H$ , мм . . . . .	500...3500
Срок службы, лет . . . . .	18
Вероятность безотказной работы . . . . .	0,996

Устройство для отбора воды из подземных водопроводов работает следующим образом. При возникновении пожара автоматически включается электродвигатель. Через редуктор крутящий момент электродвигателя передается на шпиндель, который совершает вращательное движение. Благодаря наличию на штоке выступов, входящих в пазы неподвижной втулки, шток поднимается вверх вместе с жестко связанным с ним клапаном. При поднимании клапана с уплотнительным кольцом жидкость под давлением поступает из трубопровода через образовавшуюся между клапаном и седлом кольцевую щель в полость корпуса. В начальной стадии открывания клапана образуется равномерное поле скоростей потока между седлом и цилиндрическим участком клапана, расположенным в средней его части (ниже уплотнительного кольца), чем достигается устойчивая (без появления срывной кавитации<sup>1</sup>) подача жидкости. Цилиндрический стержень нижней части клапана скользит во втулке, прикрепленной к седлу спицами, ориентированными под острым углом к оси корпуса, и полностью устраняет воздействие несимметричного усилия гидродинамического давления потока, действующего на клапан, резьбовой привод шпинделя и штока. Для удобства осмотра во время эксплуатации вращающиеся резьбовые части шпинделя расположены в наземной части гидранта и легко расчленяются с валом электродвигателя.

К данному гидранту был разработан клапан с кавитационно-устойчивой характеристикой. Стендовые и на-

<sup>1</sup> Причиной срывной кавитации являются периодически образующиеся за неровностями обтекаемых тел вихри.

турные испытания нового клапана показали отсутствие срывной кавитации и неустойчивости работы клапана в режиме дросселирования потока.

Замена подземного пожарного гидранта (ГОСТ 8220—62) наземным бесколодезным гидрантом позволяет в 3 раза сократить время для отбора воды при пожаротушении, в 1,5 раза уменьшить металлоемкость при монтаже оборудования за счет исключения люка с крышкой и деталей крепления гидранта к стенке водопроводного колодца) и в 2,2 раза сократить затраты на установку пожарного гидранта на водопроводной сети.

Применение нового устройства в качестве КПУ для стационарных установок водяного пенного пожаротушения даст возможность не строить вспомогательных помещений для их размещения. Весьма эффективно применение устройства с электроприводом для отбора воды из подземных водопроводов при строительстве стационарных установок пожаротушения открытых технологических комплексов химической, нефтехимической, нефтяной и газовой промышленности; стационарных установок пенного пожаротушения резервуаров с нефтью и продуктами ее переработки; сооружений, расположенных на открытом воздухе, сливо-наливных эстакадах, лесобиржах и многих других объектах.

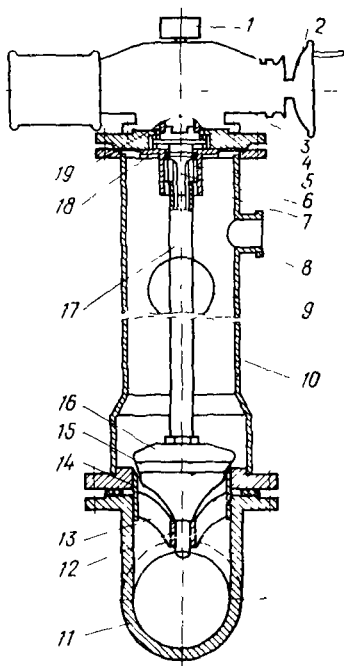


Рис 108 Устройство с электроприводом для отбора воды из подземных водопроводов

1 — пускатель 2 — ручной (дублирующий привод). 3 — редуктор. 4 — опора, 5 — направляющие лапы 6 — шпилька; 7 — выступы, 8 — патрубок  $d=77$  мм, 9 — патрубок  $d=125$  мм 10 — корпус; 11 — трубопровод, 12 — втулка, 13 — спицы, 14 — седло, 15 — уплотнительное кольцо, 16 — клапан, 17 — шток, 18 — втулка, 19 — вал передачи

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
<b>Глава 1. Потребители воды и требования к качеству водоснабжения пожарной техники и оборудования</b>	<b>4</b>
1 Виды потребителей воды	5
2 Нормы водопотребления	6
Расход воды для тушения пожаров передвижными средствами	7
Расход воды для тушения пожаров внутри зданий	10
Расчет требуемого количества воды по зарубежным данным	12
Прогнозирование водопотребления	14
Расход воды на хозяйственно-бытовые и производственные нужды Неравномерность водопотребления	16
<b>Глава 2. Системы водоснабжения и режим их работы</b>	<b>19</b>
1 Классификация систем водоснабжения	19
Мультифункциональные системы водоснабжения	20
2 Схемы водоснабжения	23
Водопроводы для наружного пожаротушения	26
Внутренний противопожарный водопровод	31
Спринклерное и дренчерное оборудование	31
Установки лафетных стволов	33
3. Обоснование проектных решений	34
Эффективность варианта технического решения	35
Характеристика качества функционирования системы противопожарного водоснабжения	42
4. Техничко-экономический анализ	48
Этапы технико-экономического анализа	49
Определение параметров экономически наиболее выгодного режима подачи воды	53
Оптимизация надежности системы противопожарного водоснабжения	57
Капитальные вложения	58
Ущерб от пожаров	68
5 Построение рациональной структуры противопожарного водоснабжения	69
6 Методика разработки рационального варианта системы противопожарного водоснабжения	70
<b>Глава 3. Многофункциональные системы коммунального водоснабжения</b>	<b>73</b>
1 Режим потребления воды и взаимодействие работы сооружений	74
Суточные объемы водопотребления населенных мест	74
Режим потребления воды населением	74
График потребления воды населением	78
Режим взаимодействия работы сооружений	79
2 Подача воды к месту пожара	82
Расчет насосно-рукавных систем	84
Перекачка воды автономными насосами	88
Параллельная работа насосов на лафетные стволы	91

3 Обеспечение бесперебойности подачи воды при пожаротушении	93
Трассировка водопроводной сети	93
4. Устройство водопроводной сети	97
Пожарные гидранты и колонки	103
5. Обеспечение бесперебойной подачи воды по водопроводной сети и водоводам	108
6. Гидравлический расчет системы подачи и распределения воды	115
7 Насосные станции для подачи воды	125
8 Резервуары чистой воды	130
9 Водонапорные башни и гидроколонны	134
10 Прогнозирование режима потребления воды при тушении пожаров	137
Расходы воды для тушения пожаров	138
Определение расхода воды	140
11. Обоснование параметров водопроводных сооружений	143
Влияние требований противопожарного водообеспечения на параметры водопроводных сооружений	146
Потребление воды при тушении пожаров	150
Процесс отбора воды при тушении пожаров	156
Поток заявок на отбор воды для тушения пожаров	158
Продолжительность отбора воды	162
Одновременное число отборов воды	163
Расход воды для тушения одновременно возникших пожаров	165
Качество бесперебойного водообеспечения	167
12 Надежность водоснабжения	169
Показатели оценки надежности	170
Отказы системы	173
Влияние случайных факторов	179
Модель функционирования	180
Пути обеспечения надежности	185
13 Работа водопроводных сетей при нефиксированном отборе воды	188
<b>Глава 4. Противопожарное водоснабжение промышленных предприятий</b>	<b>192</b>
1 Потребление воды промышленными предприятиями	193
2 Схемы водоснабжения	193
3 Расчет гидравлических параметров пожарных струй	198
Истечение жидкости из пожарных стволов	202
Коэффициент расхода жидкости из пожарного ствола	204
Потери напора в направляющей ствола	210
Потери напора в спрямляющих лопатках	212
Истечение жидкости из оросителей	214
4. Расчет параметров траектории сплошных водяных струй	219
Высота вертикальных раздробленных струй	219
Влияние шероховатости внутренней поверхности насадков на высоту струи	222
Влияние напора на высоту вертикальной струи	223
Дальность полета наклонных струй	223
Компактная часть струи	227
Рабочие пожарные струи	231
Давление пожарных струй на орошаемую поверхность	231
5. Расчет параметров канельных водяных струй	232

Факторы процесса дробления (распыления) жидкости	232
Размер капель распыленной жидкости	234
Кривые распределения размера капель	235
Распределение жидкости в потоке струи	238
Динамика движений распыленной струи	240
Аэродинамические свойства потока распыленной струи	243
6. Определение количества воды, требуемого для оборудования системы противопожарной защиты	244
Интенсивность подачи воды для тушения пожаров	245
Интенсивность подачи воды для тушения пожаров в зданиях из металлических конструкций	250
Интенсивность подачи воды для тушения пожаров горючих жидкостей	256
Интенсивность подачи воды для систем водоорошения	259
Подача воды для повышения огнестойкости стальных конструкций	262
Расход воды для создания водяных завес	267
7. Потребление воды для тушения пожаров передвижной техникой	271
Факторы, определяющие потребление воды	277
8. Противопожарное водоснабжение технологических установок, сооружений и объектов, расположенных под открытым небом	279
Противопожарное водоснабжение объектов химической и нефтеперерабатывающей промышленности	280
Новая система противопожарного водоснабжения товарно-сырьевой базы	287
Противопожарное водоснабжение крупнотоннажных комплексов по переработке нефти	295
Автоматизированная система противопожарного водоснабжения нефтеперерабатывающей установки ЭЛОУ-АВТ	301
Противопожарное водоснабжение на складах лесоматериалов	304
9. Устройство для отбора воды из противопожарных водопроводов	311

*Производственное издание*

**ЕВГЕНИЙ НИКОЛАСВИЧ ИВАНОВ**

**Противопожарное водоснабжение**

Редакция литературы по жилищно-коммунальному  
хозяйству

Зав редакцией В. И. Киселев

Редактор Р. X. Исеева

Младший редактор И. Б. Волкова

Технический редактор Г. Н. Орлова

Корректор К. М. Корепанова

**ИБ № 4005**

---

Сдано в набор 10 12 85. Подписано в печать 09 04 86. Т-08348 Формат 84×108<sup>1/32</sup>  
Бумага тип № 2. Гарнитура литературная Печать высокая. Усл. печ л. 16,80  
Усл. кр-отт 17,01 Уч-изд л. 17,69. Тираж 39 000 экз Изд № AV/—1238  
Заказ № 422/179 Цена 1 р. 10 к.

---

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Набрано в Московской типографии № 13 ПО «Периодика»

ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР

по делам издательств, полиграфии и книжной торговли

107005, Москва, Б. Б. Денисовский пер., дом 30.

Отпечатано в Подольском филиале ПО «Периодика» Союзполиграфпрома

при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии

и книжной торговли, 142110, г. Подольск, ул. Кирова, д. 25