

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ  
МЧС РОССИИ»

*На правах рукописи*

Пивоваров Николай Юрьевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДОСТАТОЧНОСТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ  
ПРИ ТУШЕНИИ КРУПНЫХ ПОЖАРОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ  
НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность  
(нефтегазовая отрасль)

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник высшей школы РФ  
Таранцев Александр Алексеевич

Санкт-Петербург – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ .....	16
1.1 Нефтехимическая промышленность как важный фактор в мировой экономике и экономике России.....	16
1.2 Пожарная опасность предприятий нефтехимической промышленности.....	26
1.3 Водоснабжение комплексов предприятий нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности и проблемы оценки водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров.....	37
Выводы по главе 1.....	44
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ, РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ТУПИКОВЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И МЕТОД ОЦЕНКИ ДОСТАТОЧНОСТИ ИХ ВОДООТДАЧИ ПРИ ТУШЕНИИ КРУПНЫХ ПОЖАРОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ .....	46
2.1 Расчетное моделирование систем наружного противопожарного водоснабжения.....	46
2.2 Расчетная модель течения жидкости.....	51
2.3 Модели и методы оценки водоотдачи кольцевой и тупиковой сети наружного противопожарного водоснабжения.....	53
Выводы по главе 2.....	64
ГЛАВА 3. МЕТОД ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....	67

3.1 Метод оценки живучести сетей наружного противопожарного водоснабжения при повреждениях участков трубопроводов на предприятиях нефтехимической промышленности.....	67
3.2 Расчётная оценка живучести сетей наружного противопожарного водоснабжения.....	83
Выводы по главе 3.....	87
ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ ВОДООТДАЧИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ЧАСТИ УТОЧНЁННОЙ ОЦЕНКИ ВОДООТДАЧИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....	88
4.1 Компьютерный эксперимент по оценке водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения.....	88
4.2 Рекомендации по совершенствованию нормативных документов в части уточнённой оценки водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения.....	97
Выводы по главе 4.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	104
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А Методические рекомендации по оценке водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Вид окна программы математического пакета Mathcad для расчета водоотдачи сети наружного противопожарного водоснабжения.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акты внедрения результатов исследования.....	147

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность диссертационного исследования.** Согласно стратегии национальной безопасности Российской Федерации [1] основными угрозами государственной и общественной безопасности являются стихийные бедствия, аварии и катастрофы, связанные с возникновением пожаров, требующих для тушения большого расхода огнетушащих веществ (далее – крупные пожары).

Крупные пожары на предприятиях нефтехимической (НХП) промышленности в России и мире происходят по статистике ежегодно и сопровождаются значительным материальным, экологическим ущербом и человеческими жертвами. Также, крупными пожарами на таких предприятиях, как правило, сопровождаются и другие виды аварийных ситуаций (АС) (по [2] АС – сочетание условий и обстоятельств, создающих аварийную обстановку): утечка жидких либо газообразных углеводородов (УВ), взрыв газопаровоздушной смеси УВ в резервуарах хранения, разрушение технологических установок (ТУ) и технологического оборудования (ТО) и т.д.

Для борьбы с крупными пожарами на предприятиях НХП, как правило, необходимы большие расходы огнетушащих веществ (ОТВ). Основным ОТВ при тушении пожаров на рассматриваемых объектах является воздушно-механическая пена (ВМП) низкой, средней или высокой кратности, которую подают на поверхность горючей жидкости. Однако, для получения ВМП и защиты не горящего ТО и ТУ, требуется большое количество (и, соответственно, расход) воды, основным источником которой являются системы наружного противопожарного водоснабжения (НППВ).

Система НППВ может быть либо самостоятельной, либо входить в состав объединенного городского хозяйственно-питьевого водопровода (Рисунок 1) или промышленного предприятия (Рисунок 2) и включает в себя насосные станции (НС), кольцевые и тупиковые сети водоснабжения, пожарные гидранты (ПГ) и водоёмы (ПВ).

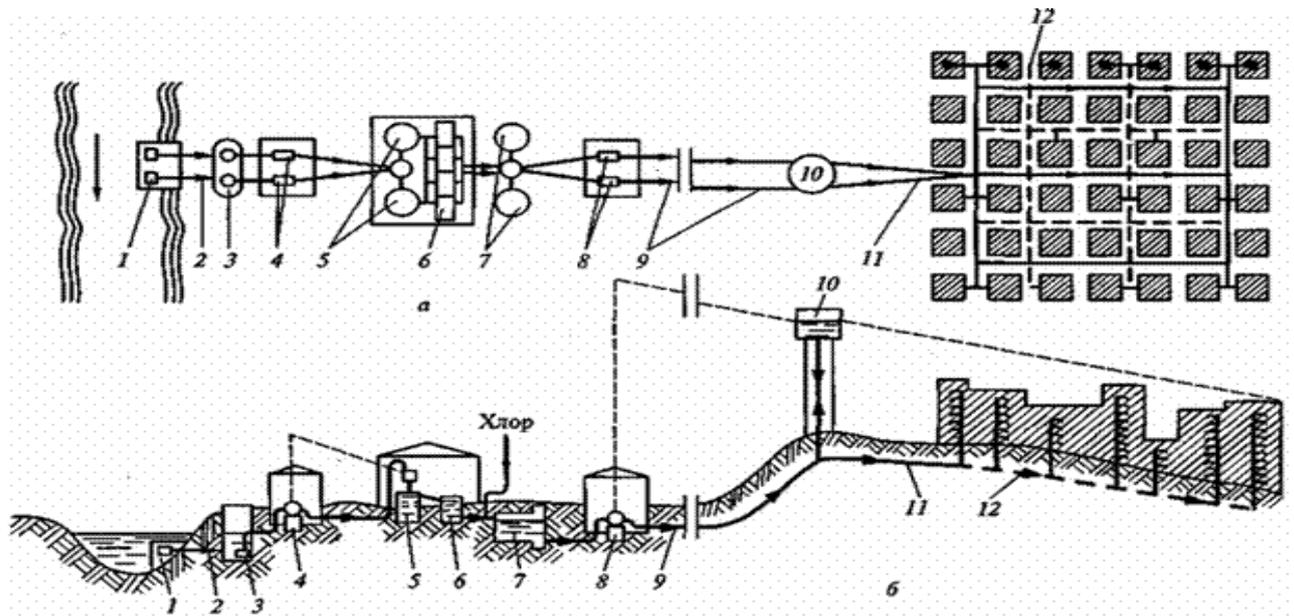


Рисунок 1 – Схема системы городского наружного водоснабжения:

1 - водоприемник; 2 - самотечные трубы; 3 - колодец береговой; 4 - НС I подъема; 5 - отстойники; 6 - фильтры; 7 - запасные резервуары чистой воды; 8 - НС II подъема; 9 - водоводы; 10 — водонапорная башня; 11 - магистральные трубопроводы; 12- трубопроводы распределительные

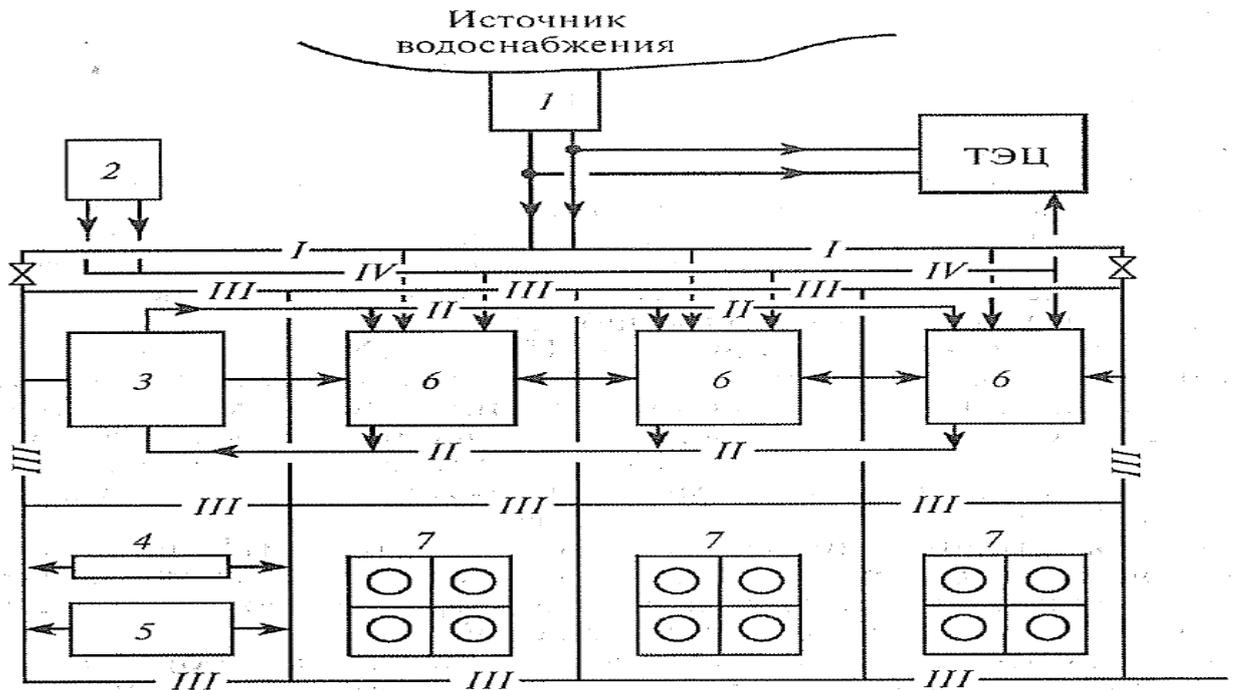


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы водоснабжения предприятия:

I – водопровод свежей воды; II – водопровод оборотной воды; III – водопровод производственно-противопожарный; IV – водопровод хозяйственно-питьевой; 1 – водозабор свежей воды и береговая НС; 2 – водозабор и НС воды; 3 – блок обратного водоснабжения; 4 – повысительная противопожарная НС; 5 – очистные сооружения производственных стоков; 6 – технологические установки; 7 – сырьевые и товарные резервуарные парки

Согласно документу «Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожаров» [3] на объекты НХП, подходящие под условия, изложенные в п.1.1 и п.1.2 Приложения №1, разрабатываются планы тушения пожаров (ПТП), в которых рассматриваются несколько вариантов возникновения возможных пожаров и условия с рекомендациями по их успешной ликвидации.

Одним из основных условий локализации и дальнейшей успешной ликвидации пожара является достаточный фактический расход ( $Q_{\phi}$ ) ОТВ, который должен быть равен, либо превышать требуемый ( $Q_{\text{тр}}$ ). В свою очередь, возможность получения  $Q_{\phi}$  оценивается по водоотдаче водопроводной сети ( $Q_{\text{вс}}$ ) НППВ. Если  $Q_{\phi} < Q_{\text{вс}}$ , то считается что объект обеспечен водой для тушения и возможный пожар может быть локализован, и, в дальнейшем, ликвидирован. Если  $Q_{\phi} > Q_{\text{вс}}$ , то предлагаются различные варианты решения проблемы недостатка воды.

Однако, до настоящего времени, не существует утвержденного нормативного документа или методических рекомендаций, определяющих метод оценки водоотдачи водопроводной сети (ВС), который бы учитывал такие параметры, как количество ( $N$ ) задействованных ПГ, гидравлические, геометрические параметры и характеристики конфигурации сети НППВ (коэффициенты сопротивления, удаленность ПГ от НС и от соседних ПГ, перепады высот местности) и др. При составлении документов оперативного планирования для оценки водоотдачи сети НППВ по умолчанию используют таблицу «Водоотдача водопроводной сети» (Таблица 1) из справочников руководителя тушения пожара (РТП) [4], которая не дает полной информации для комплексной оценки водоотдачи ВС, что может привести к критической ошибке при прогнозировании возможности локализации и ликвидации условного пожара.

Также в данной таблице не учтен тот очевидный факт, что при эксплуатации сетей НППВ происходят процессы старения магистральных трубопроводов - возрастает шероховатость внутренних стенок, появляются неплотности в соединениях элементов, свищи, и даже разрывы (Таблица 2), что, в

свою очередь, приводит к изменениям в параметрах гидравлических характеристик магистралей сетей НППВ и, в итоге, – к снижению расходов из каждого ПГ, расположенного на конкретной кольцевой либо тупиковой ВС, до недопустимо малых величин. Это в конечном счете отрицательно влияет на расходы воды из ВС (и из каждого отдельно взятого ПГ) при ликвидации пожара

Таблица 1 – Водоотдача водопроводной сети

Напор в сети, м.вод.ст.	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d$ , мм											
	100		150		200		250		300		350	
10	10	25	25	55	30	65	40	85	55	115	65	130
20	14	30	30	70	45	90	55	115	80	170	90	195
30	17	40	40	80	55	110	70	145	95	205	110	235
40	21	45	45	95	60	130	80	185	110	235	140	280
50	24	50	50	105	70	145	90	200	120	265	160	325
60	26	52	55	110	80	163	110	225	140	290	190	380
70	29	58	65	130	90	182	125	255	160	330	210	440
80	32	64	70	140	100	205	140	287	180	370	250	500

Примечание: в левой части колонок – водоотдача тупиковой, в правой части - кольцевой сети

Таблица 2 – Фрагмент из базы данных по аварийности сетей водоснабжения

№ п/п	смена (дата)	диаметр трубы	материал трубы	место повреждения
50	06.01.2013	400	сталь	проезжая часть
51	06.01.2013	100	чугун	газон
52	07.01.2013	200	сталь	проезжая часть
53	07.01.2013	250	чугун	проезжая часть
54	07.01.2013	150	чугун	проезжая часть
55	07.01.2013	500	сталь	газон
56	07.01.2013	200	сталь	газон
57	07.01.2013	200	чугун	проезжая часть
58	08.01.2013	300	чугун	газон
59	08.01.2013	100	чугун	газон

К примеру, шероховатость стальных труб очень значительно, т.е. «почти в 6 ÷ 15 раз, возрастает по мере их старения (до 1,2 ÷ 1,5 мм по сравнению с характеристикой новых труб 0,02 ÷ 0,1 мм), что приводит к возрастанию коэффициента линейного сопротивления в 2,5 ÷ 3 раза для труб с внутренним диаметром 100 мм. Это, в свою очередь, ведет к снижению водоотдачи в 1,6 ÷ 1,7 раза», что может отрицательно повлиять на возможность успешной борьбы с огненной стихией на начальной стадии, когда пожар еще возможно локализовать на небольшой площади, сравнительно с той, на которую он в дальнейшем может распространиться.

Особенно проблема оценки и обеспечения достаточности водоотдачи сетей водоснабжения для тушения пожара усугубляется в результате возникновения «аварийных ситуаций природного или техногенного характера, когда пожару предшествует, например, взрыв в здании, сооружении, или на территории товарно-сырьевого парка предприятия НХП. При этом происходит деформация участков магистральных трубопроводов сети НППВ, что также приводит к их частичной разгерметизации, и негативному влиянию на расходы воды из ВС при тушении пожара. Водоотдача из каждого отдельно взятого ПГ в этом случае может снизиться в 1,5÷2 раза и более с соответствующими отрицательными последствиями». Известные аналитические и табличные методы, как правило, не позволяют при составлении документов предварительного планирования на предприятия НХП учесть указанные эффекты. Для уточнения и оптимизации расчетов данных параметров предлагается использовать расчетное моделирование водоотдачи систем НППВ.

**Степень разработанности темы исследования.** Развитию систем противопожарного водоснабжения способствовало совершенствование насосостроения. В 1754 г. действительный член Академии наук Леонард Эйлер разработал основы теории центробежных машин и механизмов, позволившей проектировать и строить центробежные машины с высоким коэффициентом полезного действия. Однако их практическое применение до начала XX века

задерживалось ввиду отсутствия быстроходного приводного двигателя. В последней четверти XVIII века в России появляются, а в начале XIX века начинается систематическое производство паровых машин и распространение поршневых насосов с их применением в водопроводном деле. Модернизации противопожарного водоснабжения в России способствовало появление в начале XX века электродвигателя и паровой турбины, что дало резкий толчок широкому применению центробежных насосов. Н.Е. Жуковский и С.А. Чаплыгин, создав основы теории лопастей рабочих колес и направляющих аппаратов, значительно расширили и углубили теорию центробежных машин. Последующие работы И.И. Кукалевского, И.Н. Вознесенского, И.Г. Есьмана, Г.Ф. Проскуры, С.С. Руднева позволили значительно усовершенствовать центробежные насосы.

Русские ученые и инженеры В.Е. Тимонов, К.М. Игнатов, Н.К. Чижов, Н.П. Зимин, А.А. Сурин, Н.Н. Тениев, Н.А. Кашкаров, М.Г. Мельников, Н.Г. Малишевский, Н.Н. Абрамов и др. внесли большой вклад в развитие научных основ и инженерных решений по водопроводной технике. В разработку ряда специальных вопросов противопожарного водоснабжения много труда вложили В.Г. Лобачев, Н.А. Тарасов-Агалаков, Е.Н. Иванов.

Французский инженер Анри Пито разработал первый прибор для измерения скорости жидкости в 1730 году. В 1875 году это изобретение было использовано для измерения расхода воды из пожарного гидранта. Однако трубка Пито не могла быть использована для измерения расхода в закрытых трубопроводах до тех пор, пока датчик прибора не был модифицирован братьями Коулами в 1895 г.

Первый расходомер объемного типа для измерения расхода воды в трубопроводах, с использованием возвратно-поступательных движений поршней был разработан Уильямом Сьюэллом в 1850 году. Первые коммерческие доступные счетчики были сделаны Генри Уортингом.

Джонн Тилден получил первый патент на дисковый измерительный прибор в 1892 году, а конический дисковый расходомер был продан Джорджем Бассеттом в том же году. Шестеренки для этих счетчиков нужно было покрывать

маслом. Это неудобство было устранено с изобретением счетчика магнитного привода в конце 1950-х годов.

Компания Siemens & Halske начала производство первых замкнутых измерителей потока в 1865 году. Первые расходомеры, которые напоминали современные турбинные счетчики, назывались торрент-счетчиками и впервые были использованы в 1895 году.

Большинство изобретенных к тому времени датчиков измерителей суммировали общий расход и не предоставляли информацию о скорости потребления. Однако в 1931 году Фрэнк Брейнард изобрел устройство, которое регистрировало информацию о скорости потока, а также общий расход системы водоснабжения. В дальнейшем эти устройства были модифицированы для применения в современных системах водоснабжения русскими и зарубежными инженерами.

Из сравнительно недавних работ, в которых рассматривались проблемные вопросы проектирования, создания и функционирования систем городского водоснабжения и водоснабжения промышленных предприятий (в т.ч. и противопожарного) можно выделить труды Ю.Г. Абросимова, А.П. Авсюкевича, Ч.С. Гомеса, О.В. Грудановой, В.С. Игнатчика, Ф.В. Карамазинова, С.Н. Карамбиров, Р.Х. Каримова, Ш.Х. Ле, Д.М. Лиханова, Л.М. Мешмана, Ю.В. Мисевич, В.А. Орлова, С.А. Сазоновой, В.П. Фатеева, и многих других.

Из числа зарубежных авторов, занимавшихся вопросами надежности систем водоснабжения, можно выделить труды исследователей De la Mare and Anderson, Bakouros, Tatsuoka and Tieteman, Shamir and Howard, Clark, Kettler and Goulter, Andreou, Kazemi, Kleiner and Rajani, Prasad, Vanrenterghem-Raven, Aslani and Christodoulou, Kanakoudis and Tolikas, Muhammetoglu, Tiryakioglu и многих других.

Однако состояние и современный этап развития рассматриваемой предметной области делают актуальной проблему комплексного исследования, направленного на совершенствование и оптимизацию научно-методических

средств решения задачи численной оценки водоотдачи сетей НППВ, для обеспечения достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях НХП.

**Целью диссертационного исследования** является разработка моделей и методов оценки достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях НХП для оптимизации расчетов водоотдачи сетей НППВ.

**Научной задачей диссертационного исследования** является разработка научно-методических средств для оценки достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях НХП. В рамках решения данной задачи решаются следующие частные **научные задачи**:

- разработка расчётных моделей тупиковых и кольцевых сетей НППВ предприятий НХП;
- разработка метода оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей НППВ при тушении крупных пожаров на предприятиях НХП;
- разработка метода оценки живучести сетей НППВ при повреждениях участков трубопроводов на предприятиях НХП;
- разработка проекта методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей НППВ.

**Объект исследования** – системы НППВ предприятий НХП.

**Предмет исследования** – модели и методы оценки водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения..

**Методы исследования:** системный анализ, теория напорного движения жидкости, теория гидравлических машин, математическое моделирование.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в разработке расчётных моделей и метода оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей НППВ при тушении крупных пожаров на предприятиях НХП с учётом геометрических особенностей сетей, возможностей НС, рельефа местности, количества и взаимного расположения задействованных ПГ. Также введено понятие «живучесть» сетей НППВ и предложен метод её количественной

оценки при повреждениях участков трубопроводов в условиях ЧС природного и техногенного характера.

**Теоретическая значимость диссертационного исследования** заключается в разработке расчётных моделей и метода оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей НППВ при тушении крупных пожаров на предприятиях НХП; разработке метода оценки живучести сетей НППВ при повреждениях участков трубопроводов в условиях возникновения ЧС природного и техногенного характера на предприятиях НХП; разработке проекта методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей НППВ.

**Практическая значимость диссертационного исследования** заключается в том, что при помощи разработанных моделей и методов представляется возможным оптимизировать расчеты водоотдачи сетей НППВ с учетом числа и взаимного расположения задействованных ПГ, перепадов высот местности и НРХ насосов с использованием выведенных аналитических выражений и разработанной компьютерной программы в среде MathCad. Это, в свою очередь, позволяет: а) осуществлять объективную оценку достаточности водоснабжения при составлении ПТП для предприятий НХП; б) разрабатывать паспорта водоотдачи на сети НППВ; в) создать проект Методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей НППВ, которые могут как войти приложением в действующие документы по пожарной безопасности, так и использоваться в качестве самостоятельного документа.

**Достоверность и обоснованность основных положений диссертационного исследования** подтверждается применением современных методов компьютерного моделирования, системного анализа, фундаментальных основ теории напорного движения жидкости, корректным использованием результатов расчётов гидравлических характеристик сетей наружного противопожарного водоснабжения, пожарных гидрантов и насосов, используемых в насосных станциях, а также согласованностью результатов с исследованиями, проведенными такими учёными, как Мисевич Ю.В., Абросимов Ю.Г., Зыков В.В.,

Игнатчик В.С., Кармазинов Ф.В., Мазур А.С., Швырков С.А., Мешман Л.М., Орлов В.А., Сазонова С.А., Груданова О.В. и др.

**Диссертационное исследование проведено в рамках научной специальности 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность паспорта специальностей ВАК (технические науки) и соответствует:** п.3 «научное обоснование принципов и способов обеспечения промышленной и пожарной безопасности на предприятиях промышленности...»; п.6 «исследование, разработка средств и методов, обеспечивающих ... предупреждение пожаров и аварий, тушение пожаров»; п.9 «исследование процессов протекания аварий... разработка методов оценки различных воздействий, проявляющихся в процессе развития аварий на нефтегазовых объектах»; п.15 «разработка методологических основ и нормативных положений для создания правил обеспечения пожарной и промышленной безопасности при строительстве и эксплуатации предприятий и объектов повышенной опасности».

#### **Основные научные результаты, выносимые на защиту.**

1. Расчётные модели тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения предприятий нефтехимической промышленности.

2. Методы оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности.

3. Метод оценки живучести сетей при повреждении участков трубопроводов на предприятиях нефтехимической промышленности.

**Апробация результатов диссертационного исследования.** Основные научные результаты, полученные в диссертационном исследовании, докладывались и обсуждались на научных семинарах, заседаниях кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России и на научно-практических конференциях: научно-практическом семинаре «Системный анализ научных

исследований» (г. Санкт-Петербург, 31 мая 2012 г.), VIII Международной научно-практической конференции «Подготовка кадров в системе предупреждения и ликвидации последствий ЧС» (г. Санкт-Петербург, 15 октября 2013 г.), научно-практическом семинаре «Актуальные проблемы отрасли науки» (г. Санкт-Петербург, 15 ноября 2013 г.), V Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Вопросы обеспечения комплексной безопасности деятельности в Арктическом регионе» (г. Санкт-Петербург, 10 октября 2014 г.), Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: теория и практика» «ЧС – 2015» (Республика Беларусь, г. Гомель, 25 мая 2015 г.), Международной научно-практической конференции «Нурлы жол – путь в будущее»: научное обеспечение безопасности и жизнедеятельности населения» (Республика Казахстан, г. Кокшетау, 27 марта 2015 г.), IV Международной научно-практической конференции «Проблемы техносферной безопасности – 2015» (г. Москва, 7-8 апреля 2015 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» (г. Воронеж, 17 апреля 2015 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Системы обеспечения техносферной безопасности» (г. Таганрог, 14-15 октября 2016 г.).

#### **Реализация результатов диссертационного исследования.**

Разработанный метод оценки живучести сетей наружного противопожарного водоснабжения при повреждениях участков трубопроводов на предприятиях нефтехимической промышленности и методы оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности использованы: при составлении документов оперативного планирования и методических планов проведения учений в ФГКУ «СПСЧ ФПС по Новосибирской области»; при разработке документов оперативного планирования действий по тушению пожаров в Санкт-Петербургском политехническом

университете Петра Великого; при подготовке проекта Методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения и приложения к СП 8.13130.2009 в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России; в учебном процессе Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулёва.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 7 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ, 7 тезисов в научных конференциях.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **1.1 Нефтехимическая промышленность как важный фактор в мировой экономике и экономике России**

Нефтехимическая промышленность – отрасль тяжелой индустрии, являющаяся частью химического комплекса. Она принадлежит к числу одних из наиболее стремительно развивающихся отраслей промышленности и основана на продуктах переработки природного газа и нефти. За сравнительно короткий исторический срок НХП заняла прочные позиции во всем мире, составляя десятую долю в экономике большинства стран, расположенных практически на всех континентах. НХП насчитывает тысячи производств и предприятий по всему миру. Продукция НХП находит применение в ряде других отраслей (машиностроение, электроника, аэрокосмическая, строительство, и, особенно, автомобилестроение), а также в сельскохозяйственном комплексе, производстве товаров для спорта, медицине, туризме, средствах коммуникации, отдыха, и т.п. Машиностроение нуждается в красках, лаках, пластмассах; сельское хозяйство – в химикатах для защиты от вредителей растений, минеральных удобрениях, кормовых добавках; транспорт – в смазочных материалах, моторном топливе, синтетическом каучуке. НХП становится источником сырьевых ресурсов для производства товаров широкого круга потребления, особенно пластмасс и химических волокон. Современное ракетостроение, радиолокация, реактивная техника, космическая техника, самолетостроение и т.д. немислимы без использования новых видов синтезированного топлива и разнообразных синтетических материалов [5–9]. Опасность возникновения и возможность дальнейшего развития АС на предприятиях НХП определяется физико-химическими параметрами свойств используемого сырья (нефти и газа), а также взрывопожароопасными технологическими процессами их переработки. Обеспечение гарантии промышленной (в т.ч. и пожарной) безопасности на

предприятиях НХП является одним из самых приоритетных направлений государственной политики стран, в т.ч. России, – крупнейших участников мирового нефтяного рынка [10–22].

Нефтеперерабатывающая промышленность (НПП) непосредственно связана с НХП в качестве источника сырья и является одним из ключевых звеньев в технологической цепочке нефтяной отрасли в целом, так как нефть, в отличие от прочих первичных энергоресурсов (древесины, торфа, угля, газа) в области конечного потребления почти не используется в сыром виде. В сферу конечного потребления нефть поступает только после переработки в виде самых разнообразных нефтепродуктов – смазочных масел, моторных топлив, нефтебитумов, кокса, сырья для НХП, топочного мазута [23–29].



Рисунок 3 – Комплекс нефтехимического и нефтеперерабатывающего завода в Нижнекамске

Широко распространено совместное строительство нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (Рисунок 3). Нефтехимические производства используют в качестве сырья газовый конденсат, ароматические углеводороды (бензол, толуол), прямогонный бензин,

ароматические углеводороды (бензол, толуол), индивидуальные легкие парафиновые углеводороды, смеси высших алканов (жидкие и твердые парафины). Нефтехимические цеха могут быть частью крупных производственных объединений, в состав которых входят и нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ). Сырье с нефтеперерабатывающей на нефтехимическую часть поступает по магистральным трубопроводам. Так запроектированы, в частности, промышленные предприятия в Перми, Ангарске, Салавате, Нижнекамске и других городах. В остальных случаях нефтехимические производства функционируют независимо от НПЗ (Тобольский и Томский нефтехимические комбинаты), а получают сырье по железной дороге или магистральным продуктопроводам. Главным производством нефтехимического завода (НХЗ) в большинстве случаев является пиролиз с получением пропилена, этилена, бутилен-дивинильной фракции, жидких продуктов, в которых содержится 60–90 % (мас.) ароматических и 10–40 % (мас.) неароматических углеводородов (в основном, диенов, олефинов и циклоолефинов). На основе полученных продуктов осуществляется широкая гамма нефтехимических синтезов. Схема переработки нефти и нефтепродуктов приведена на Рисунке 4 [9, 29–31].



Рисунок 4 – Структурная схема переработки нефти и нефтепродуктов

Очевидно, что не возможно серьезно оценить в экономическом плане долгосрочные перспективы этих двух глубоко взаимосвязанных областей нефтяного сектора (НХП и НПП), не оценив объем запасов снабжающих их ресурсов. В конце 1999 г. мировые доказанные запасы нефти были оценены приблизительно в 145 гигатонн. При существующем темпе потребления углеводородов, эти запасы будут исчерпаны приблизительно через 40 лет (учитывая среднюю динамику потребления 3–4 гигатонны в год) и через 29 лет, если рост в мировом потреблении составит 2% в год.

Окончательные запасы чрезвычайно трудно оценить, поскольку в этом прогнозе присутствует много неизвестных. Данные этих прогнозов напрямую зависят от методики определения запасов, самых разнообразных рассматриваемых критериев и коэффициентов в этих методиках, и степени оптимистичности или пессимистичности применяющих их специалистов, и, поэтому, значительно варьируются в итоговых цифрах. Например, жидкие запасы углеводородов оценены в 370 гигатонн Международным энергетическим агентством и в 645 гигатонн энергетическим Информационным агентством.

Мировое производство жидких углеводородов, по усредненной оценке из разных источников, достигнет максимума приблизительно в 2015–2035 годах. В зависимости от сценариев роста их потребления и от выбора одного из вышеприведенных прогнозов разведанных запасов сырья, окончательные резервы 370 гигатонн будут истощены через 60–100 лет, а 645 гигатонн не более чем через 150 лет. Таким образом, жидкие запасы углеводородов на ближайшие век–полтора все еще значительные, но их разведка, добыча и доставка на промышленные предприятия потребует больших усилий в части сохранения баланса «целесообразность–прибыльность». Когда-нибудь в середине или конце XXI века, мы повернемся к природному газу, как основному источнику энергии, а невозобновляемые источники должны будут использоваться в небольших количествах.

Хотя существующие мировые углеводородные ресурсы достаточны, чтобы удовлетворить запросы НХП и НПП в первой половине XXI века, их географический разброс и труднодобываемость уже создают проблему для всей нефтяной отрасли в целом. Основная часть (66,5%), из 145 гигатонн разведанных нефтяных запасов, располагается в географической зоне Ближнего Востока, где геополитический вопрос находится в нерешенном состоянии. Мир все больше и больше будет энергетически зависеть от этой зоны в ближайшие десятилетия. Кроме того, большинство потребительских зон расположено далеко от производственных зон промышленных предприятий, вследствие чего широко встает проблема транспортировки углеводородов.

Если учитывать, что существенных изменений в политике относительно потребности в энергии и в ценах на сырую нефть в ближайшие десятилетия не предвидится, то ежегодное потребление углеводородов должно увеличиться до 5 и более гигатонн за год к 2020 году.

А если делать прогноз относительно нефтехимических веществ, то рост потребности в олефинах и ароматических нефтепродуктах останется устойчивым. Между 1995 и 2005 годами спрос на олефины возрастал со скоростью более чем 4% в год и для ароматических нефтепродуктов на 3,6%. Рост потребности в олефинах продолжится, скорее всего, в районе от 4% до 5% для этилена, от 5% до 6% для пропилена, до 6% для изобутана и до 3,3% для бутадиена.

Прогнозы до 2020 года для мирового спроса в ароматических нефтепродуктах (Рисунок 5) предсказывают рост потребления всех моноароматических углеводородов в диапазоне от 3,5% до 4,5% в год для бензола, от 5% до 8% для полипропилена, что значительно ниже других ароматических углеводородов. Этим объясняется отсутствие баланса между ростом спроса на бензол и ксилолом. Полный спрос на нефтехимические вещества должен достигнуть приблизительно 250 мегатонн к 2020 году [5–8, 24–27, 32].

Исходя из вышеприведенных сценариев, экономическое развитие Российской Федерации в большой степени зависит от эффективного управления и технологической модернизации предприятий нефтехимического комплекса. В настоящее время конкурентоспособность российского нефтехимического комплекса, прежде всего, основана на использовании основных национальных преимуществ (доступность натурального сырья, топлива и энергетических ресурсов) и применении механизма ценовой конкуренции. Прогнозирование развития нефтехимического комплекса помогает дать оценку дальнейшей модели развития экономики и показать цель стратегических приоритетов. Экономическая целесообразность и успех внедрения стратегической программы развития основаны на многих факторах. В рамках общего прогнозирования социально-экономического развития страны для нефтехимических комплексов это следующие факторы: прогнозирование спроса на полимеры на внутреннем рынке, связанное с прогнозированием отношения импорта и экспорта для конечных продуктов полимеров; потребность в основных типах сырья для производства и т.д.



Рисунок 5 – Роль нефтехимической промышленности в мировой экономике

Конкурентоспособность нефтехимических компаний в России и за рубежом неразрывно связана с применением инноваций и достижений научно-технического прогресса. В последние десятилетия произошли существенные изменения в научно-технических и технологических областях. Жизненный цикл технологических процессов и продуктов, которые раньше измерялись несколькими десятками лет, теперь, во многих случаях, меньше 5 лет. Прошедшие 30-40 лет составляют приблизительно 90% всех глобальных решений в области химической науки, технологии и производства. Сокращение жизненного цикла новых продуктов и технологии существенно повышает потребность в усилении ориентированности выпускаемой продукции к удовлетворению спроса на фоне быстро изменяющейся внешней конъюнктуры, уменьшая время для развития и принятия новых решений в технологии производства [25–27, 33].

Согласно Распоряжению Правительства РФ от 18 мая 2016 года №954-р «Об утверждении плана реализации Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года», предусмотрены следующие мероприятия для поддержки и развития нефтехимического сектора экономики:

- субсидирование предприятий нефтехимической промышленности;
- разработка государственной программы перевооружения предприятий станкостроения и химического машиностроения в целях вывода на рынок нового отечественного оборудования для нефтехимического и химического комплекса;
- подготовка проекта предложений по внесению изменений в действующие нормы и правила в области проектирования, реконструкции и строительства нефтегазохимических и химических производств, актуализация соответствующих национальных стандартов в области нефтехимического и химического комплекса;

- реализация отраслевых планов импортозамещения в химической и нефтегазохимической промышленности;
- повышение инвестиционной привлекательности организаций нефтехимического и химического комплекса применением механизма специального инвестиционного контракта;
- утверждение документа методических рекомендаций о механизмах функционирования и структуре нефтегазохимических кластеров;
- подготовка проектов по созданию новых и (или) развитию действующих (нефте) химических индустриальных парков и прочее [27].

В процессе реализации программы «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» [26–27] планируется сосредоточить кластерным способом крупнейшие центры нефтехимической промышленности в шести регионах России: Каспийском, Северо-Западном, Волжском, Западно-Сибирском, Восточно-Сибирском и Дальневосточном (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Крупнейшие центры нефтехимической промышленности России

Крупнейшими экспортными рынками России базовых продуктов нефтехимии остаются Китай, страны СНГ, Германия, Польша; готовых продуктов

– страны СНГ, Финляндия, Германия. Крупнейшими импортерами за рубежом базовых продуктов нефтехимии являются Китай, США, страны ЕС; готовых продуктов – США, Китай, страны ЕС и Мексика (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Крупнейшие мировые импортеры нефтехимии и экспортные рынки России

В соответствии с обязательными требованиями нормативных документов регламентирующих положения по промышленной безопасности для химически опасных и взрывопожароопасных производств, должны быть разработаны планы ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС), содержащие перечень мероприятий по предупреждению аварийных и других нештатных ситуаций, и порядок действий в случае их возникновения [34–54]. Нарушение порядка технологического процесса, несоблюдение требований и норм промышленной безопасности при пуске, остановке, проведении ремонтов и эксплуатации взрывопожароопасных производственных объектов НХП и НПП может привести (Рисунок 8) к разгерметизации оборудования, арматуры, трубопроводов, разливу нефтепродуктов, утечке газа, взрыву и, как следствие этого, к возникновению крупного пожара [55–82].

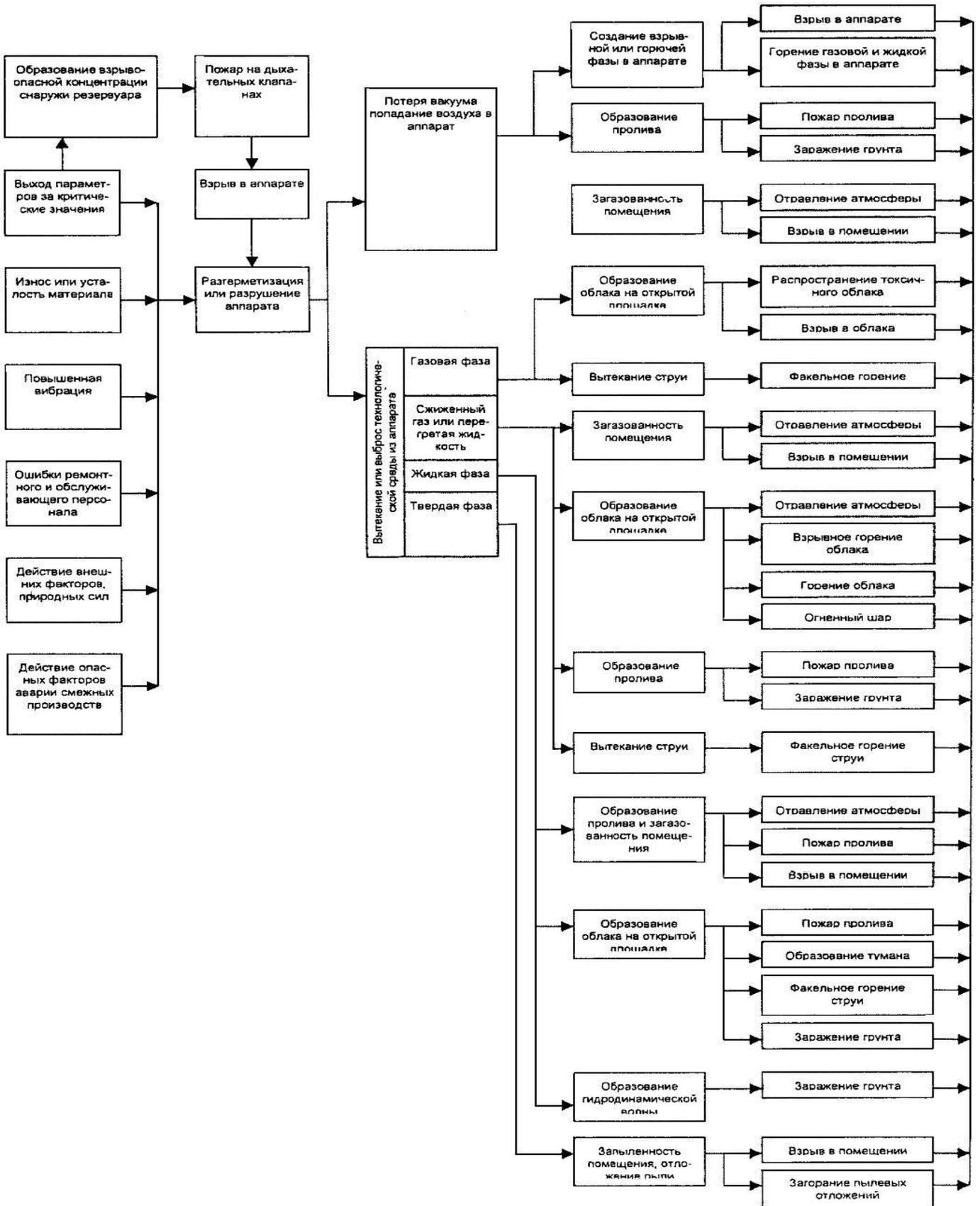


Рисунок 8 – Дерево событий при возникновении аварийной ситуации на предприятии НХП

## 1.2 Пожарная опасность предприятий нефтехимической промышленности

Добыча, хранение, транспортировка, переработка нефти и нефтепродуктов относится к категории потенциально опасных производств, а соответствующие предприятия НХП и НПП являются объектами повышенного риска [5, 7, 22, 83–85].

Причины АС на объектах НХП и НПП можно классифицировать по двум основным группам: организационной и технической. Анализ статистических данных расследования причин имевших место опасных событий с технической составляющей показал, что в основном факторами их возникновения и развития являются низкое качество сборки и, соответственно, функционирования ТУ и ТО, а также несовершенство технологических операций или конструктивные недостатки (допущенные при проектировании) зданий и сооружений промышленного объекта. К причинам организационного характера относятся: нарушение технологического регламента производства работ, неэффективность управления и производственного контроля, преднамеренное отключение (не включение) устройств защиты, датчиков сигнализации или средств связи, неудовлетворительный уровень знаний требований регламентирующих документов по промышленной безопасности, нарушение производственной дисциплины, несанкционированные (не соответствующие должностным инструкциям) действия технического персонала. Износ производственного оборудования также является одним из самых распространенных факторов, влияющих на состояние промышленной безопасности производственных объектов НХП и НПП, приводящий к отказам в работе как всего комплекса предприятия, так и его отдельных технологических участков.

Оценка АС, произошедших на предприятиях НХП и НПП показывает, что самым распространенным опасным событием является нарушение герметичности оборудования из-за появления механических повреждений (Рисунок 9а) при воздействии избыточных параметров (давления, температуры, вибрации и т.д.)

технологического процесса, в результате чего появляется вероятность образования газопаровоздушного облака с его последующим воспламенением (взрывом) или происходит разлив продуктов (газо)-нефтепереработки с их последующим возгоранием, а также возможно токсическое заражение промышленной территории. По статистике большая часть аварий на рассматриваемых объектах сопровождается выбросом, разливом горючих веществ, взрывами, и, как следствие, крупными пожарами (Рисунки 8, 9б) [55, 68–71, 74, 77, 80–81, 86–99]. Приведем примеры самых масштабных из них, произошедших в России и за рубежом в XX–XXI вв.

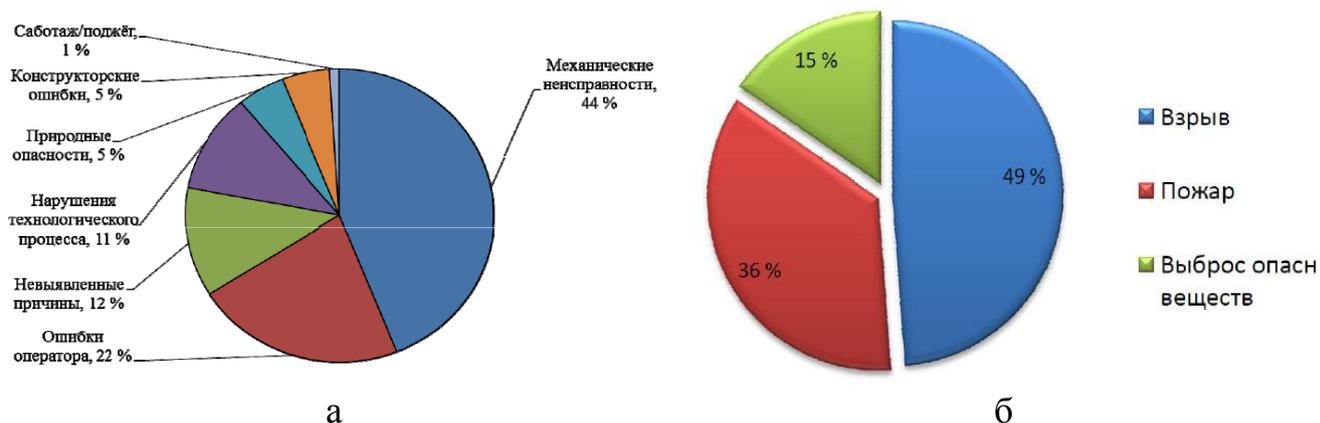


Рисунок 9 – Причины АС в мире в обрабатывающих отраслях промышленности (а) и статистика по видам аварий на предприятиях НХП и НПП (б)

20 октября 1944 г. на газоперерабатывающем заводе в Кливленде (США, штат Огайо) произошла аварийная утечка сжиженного природного газа (СПГ). Первоначально объем утечки составил приблизительно 1900 тонн, а в течении последующих 20 мин. случился повторный выброс около 1000 тонн. Вылившийся СПГ мгновенно воспламенился, и некоторая его часть, попала в сточную канализацию, где впоследствии произошли внутренние взрывы. Возникший пожар целиком уничтожил не только сам газовый завод, но и 80 жилых домов и 10 административных зданий, находившихся на расстоянии до 400 м от промышленной территории (Рисунок 10). По данным властей штата в результате

произошедшей аварии и последующего пожара погибло около 128 чел., а 400 чел. получили травмы различной степени тяжести. Ущерб составил 6,8 млн. долларов по курсу 1944 года [62, 85, 100].

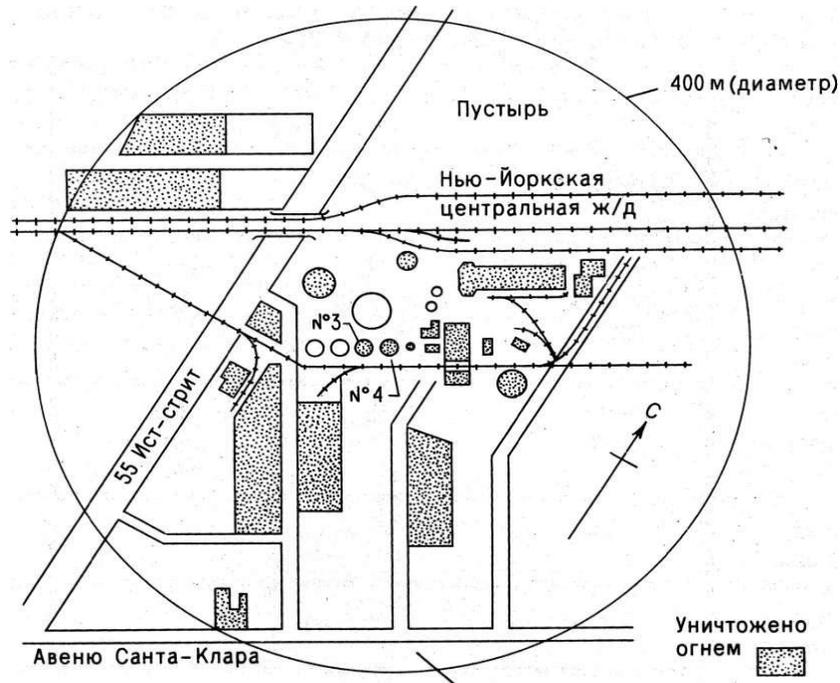


Рисунок 10 – Генплан завода газопереработки и прилегающих улиц в Кливленде

4 апреля 1952 г. в Вильгельмсбурге (ФРГ) произошел мощный взрыв на НПЗ с последующим крупным пожаром. Гигантское облако черного дыма поднялось над городом. Дальнейшее распространение огненной стихии (Рисунок 11) привело к цепочке последующих взрывов, которые образовывали огненные шары. Для тушения пожара были задействованы пенные стволы в количестве 17 штук. Общий расход воды составил 72 тыс. литров в минуту. В общей сложности было истрачено 80 тыс. литров пенообразователя. К тушению пожара были привлечены многочисленные пожарные автомобили различного (основного и специального) назначения и 4 пожарных катера. Погибло 7 человек. Ущерб составил 15,8 млн. долларов по курсу 1952 года [57, 85, 100].



Рисунок 11 – Пожар в Вильгельмсбурге

4 января 1966 г. на НПЗ в Фейзене (Франция), при попытке оператора провести простую технологическую операцию слива воды, произошел выброс 450 тонн пропана из резервуара хранения. Постепенно образовалось облако паров газопаровоздушной смеси. Ветра практически не было, поэтому оно стало стремительно распространяться во всех направлениях. Воспламенение произошло примерно через полчаса, после начала выброса, оно было вызвано проезжавшим недалеко автомобилем. Давление в резервуаре до аварии составляло 7 бар (0,7 МПа), затем из-за мощного теплового потока на резервуар, оно стало повышаться. Через 1 ч 30 мин после возникновения пожара произошел взрыв резервуара, сопровождавшийся образованием огневого шара (Рисунок 12), от которого получили травмы в общей сложности 80 чел. (из них были тяжело ранены 40 чел.) и погибли 17 чел. (из них 11 пожарных). В радиус поражения попали люди, находившиеся в момент взрыва на расстоянии до 300 м от места аварии. В дальнейшем аналогичным образом разорвались 4 сферических резервуара, и загорелось несколько резервуаров с бензином и нефтью. В основном пожар был потушен через 48 ч. Ущерб составил 7,2 млн. долларов по курсу 1966 года [62, 85, 100].

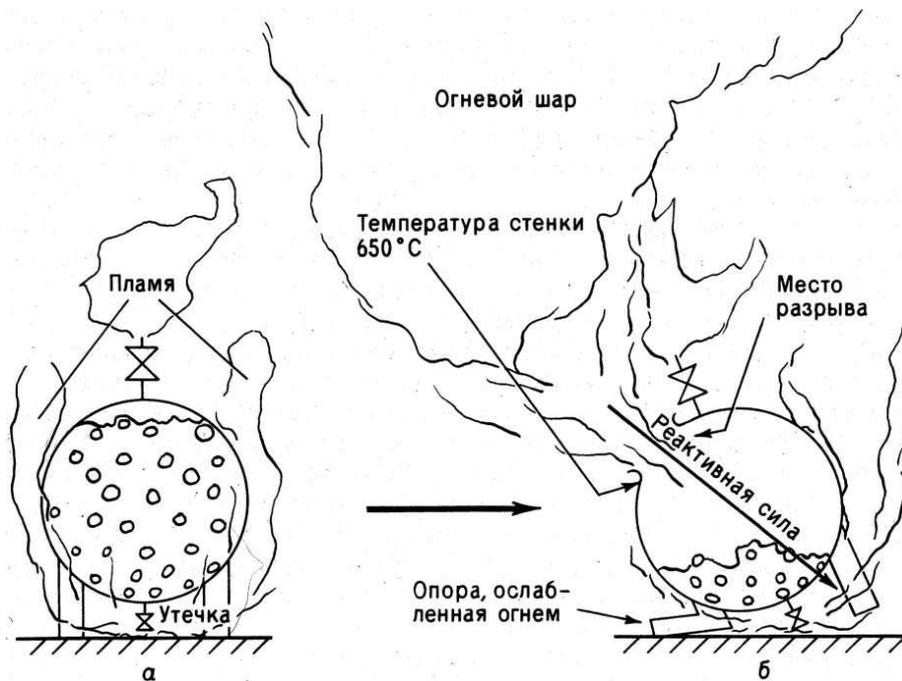


Рисунок 12 – Взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости: а – начальное состояние, б – через 1 час после начала пожара

1 июня 1974 г. в местечке Фликсборо (Великобритания) на газовом заводе частной компании Nupro Works был зарегистрирован мощный взрыв газопаровоздушного облака с последующим крупным пожаром. В результате данной аварии на территории завода были уничтожены все здания и сооружения в юго-восточной части. Дальнейшее распространение пожара удалось локализовать на площади приблизительно 6 га (60 тыс. м<sup>2</sup>). На Рисунке 13 показан план расположения завода в Фликсборо и отмечена территория, подвергшаяся пожару. Взрыв облака газопаровоздушной смеси видимо произошел из-за отказа байпаса в серии соединенных в одну цепочку реакторов, в результате чего герметичность одного из них, заполненного 125 тонн кипящего (в жидкой фазе) циклогексана под давлением 8 бар (0,8 МПа), нарушилась. Произошла мгновенная утечка около 40 тонн паров циклогексана, которые, воспламенившись, почти сразу же взорвались. После взрыва, продолжался выброс паров из реакторов, и газопаровоздушная смесь продолжала интенсивно гореть. Соседняя установка и

участок хранилища были сильно повреждены взрывом, благодаря чему образовалось многочисленное количество утечек паров углеводородов, которые в несколько раз усилили развитие пожара. Газораспределительная станция мощностью 14 тыс. м<sup>3</sup>/час, которая обеспечивала подачу газа на предприятие, была также повреждена взрывом, и в итоге вырвавшийся природный газ воспламенился. В результате последовавшего крупного пожара, продолжавшегося более двух суток, погибли 26 человек, 56 получили ожоги различной степени тяжести. В ликвидации принимали участие 50 пожарных автомобилей. Ущерб составил 12,7 млн. долларов по курсу 1974 года [62, 85, 100].

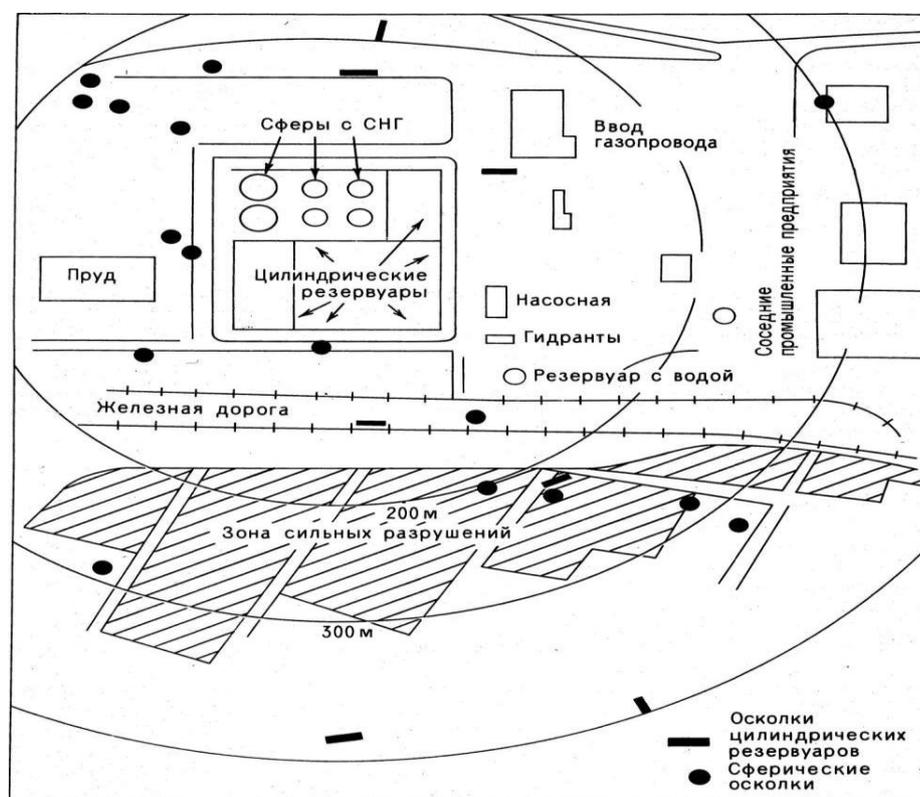


Рисунок 13 – Развитие аварии 1 июня 1974 г. в Фликсборо

19 ноября 1984 г. в пригороде Мехико Сан-Хуан-Иксуатепек (Мексика) произошла крупная утечка сжиженного нефтяного газа (СНГ) из хранилища компании PEMEX (Petroleos Mexicanos). Затем последовала серия взрывов, инициировавших пожар, который продолжался до 20 ч. На Рисунке 14 представлен план хранилища СНГ и окрестностей. В результате этой аварии

погибло не менее 500 чел., получили травмы около 7231 чел., из которых 144 скончались в больнице. Порядка 200 тыс. чел. или остались без жилья, или были эвакуированы.

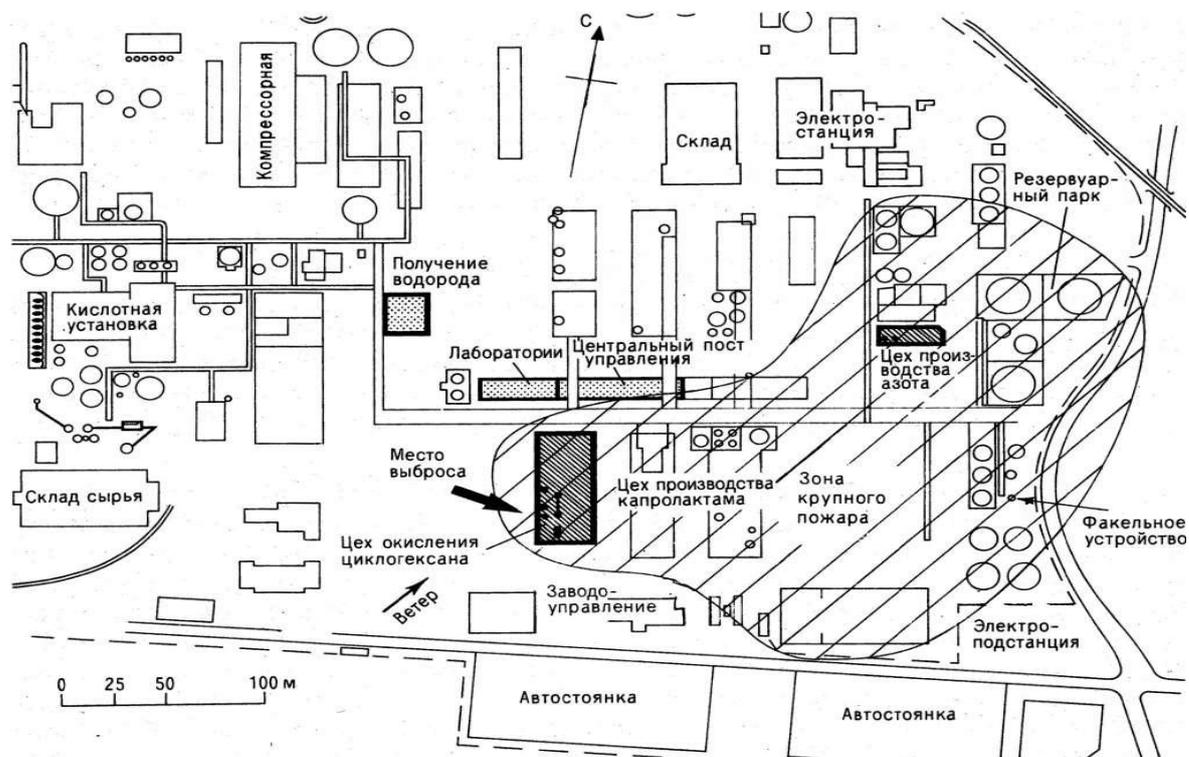


Рисунок 14 – Генплан хранилища СНГ компании PEMEX

Хранилище было предназначено для получения СНГ, поставляемого по трубопроводному транспорту с окрестных НПЗ, хранения и обеспечения им потребителей. Основная часть газа в жидком состоянии поставлялась для отопления домов Мехико с населением в 16 млн. человек. Иницирующим событием, скорее всего, стала утечка СНГ в одном из подземных трубопроводов (диаметром 0,2 метра), по которому подавался с НПЗ сжиженный газ. По всей видимости, выброс произошел в районе одного из резервуаров хранилища, где он располагался выше уровня земли. Образовавшееся облако газопаровоздушной смеси углеводородов ветром было отнесено (приблизительная скорость ветра около 0,4 м/с) на юго-запад. Воспламенение произошло в первые 5–10 минут после начала выброса СНГ, источником зажигания послужило факельное

устройство, которое находилось в 100 метрах от места утечки на уровне земли. По показаниям очевидцев воспламенение паров СНГ сопровождалось мощным взрывом. На месте возникновения первоначальной трещины из поврежденного трубопровода образовался крупный факел горящего газа, направленный в сторону одного из группы сферических резервуаров меньшей вместимости. Через 12 мин, в результате воздействия сильного теплового потока этот сферический резервуар взорвался, что привело к возникновению огневого шара диаметром около 300 метров. В течение последующих 1,5 часов произошло 7–8 мощных взрывов резервуаров. Кроме этого, произошло много сравнительно менее сильных по мощности взрывов. Большинство взорвавшихся цилиндрических резервуаров были отброшены ударной волной на различные расстояния в южном направлении из-за того, что тепловой поток от пожара был направлен на их северные торцевые части. На территории газобаллонной станции взорвались сотни баллонов с газом. Практически все здания (в т.ч. и жилые) в радиусе около 300 м были значительно повреждены и непригодны к дальнейшей эксплуатации или восстановлению. Ущерб составил 38,4 млн. долларов по курсу 1984 года [62, 85, 100].

Одним из наиболее характерных и самых опасных по своим разрушительным последствиям видов аварий в резервуарных парках предприятий НПП и НХП является разлив жидких нефтехимических веществ при мгновенном разрушении стальных вертикальных резервуаров (РВС). Площадь разлива нефтепродуктов при этом может достигать от сотен до тысяч квадратных метров. Каждый год в России регистрируется минимум две-три таких аварии. В то же время, согласно исследованиям, проведенным сотрудниками Центрального научного исследовательского и проектного института строительных металлоконструкций им. Н.П. Мельникова, фактически общее число аварий больше в 3-5 раз официально регистрируемых, в связи с чем, риск разрушений РВС в результате аварии оценивается очень высоким значением –  $3 \cdot 10^{-4}$  раз/год. В соответствии с данными отчетов по статистике аварий, которые произошли в

стране за период с 1950 по 2008 г., ни в одном из рассмотренных случаев защитные преграды (обвалования) не выполнили своего назначения (Рисунок 15).

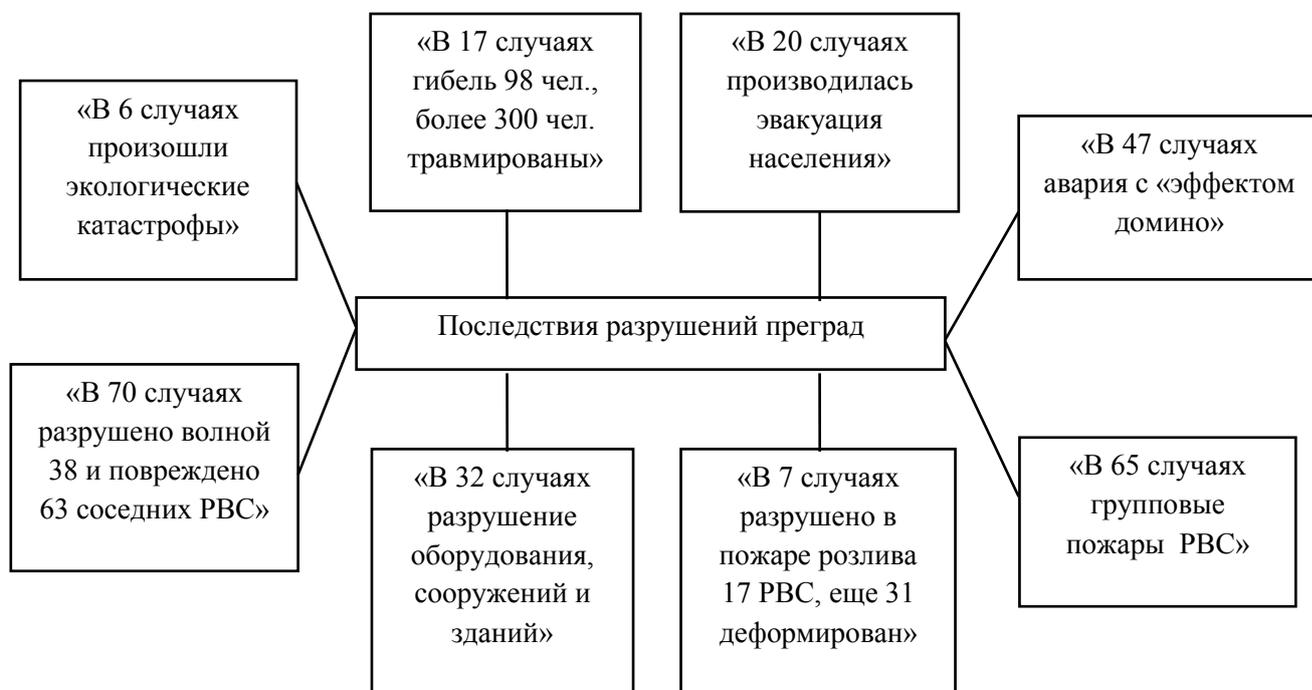


Рисунок 15 – Последствия разрушения преград при квазимгновенной разгерметизации резервуаров

Одна из самых первых таких аварий, возникшая при разрушении резервуара типа РВС-4600 м<sup>3</sup> с сырой нефтью и повлекшая гибель 24 чел, была зафиксирована в 1953 г. на НПЗ в Башкирии. В резервуарный парк НПЗ входило 3 резервуарных группы, обвалованных земляной дамбой. В результате разрушения РВС № 4 произошел выброс находящейся в нем нефти без ее воспламенения, а разорвавшийся корпус и крыша были отброшены на расстояние от 15 до 30 метров в сторону соседнего РВС № 5, который был тоже полностью заполнен нефтью. После удара конструкциями разрушенного резервуара РВС № 4 по РВС № 5 последовало его полное разрушение по вертикальному сварному шву. Вылившаяся из резервуаров нефть воспламенилась и, в дальнейшем, растекаясь за пределами парка в сторону производственных зданий, создала угрозу нефтеналивной эстакаде и железнодорожному мосту (Рисунок 16). Общая

площадь пожара разлива нефти составила более 50000 м<sup>2</sup>, в зоне горения оказались все 6 резервуаров парка. Тушение пожара длилось более часа, когда от высокой температуры разрушился РВС № 2, при этом горячей волной были повреждены два резервуара соседней группы, что привело к увеличению площади пожара до 100000 м<sup>2</sup>. Таким образом, из-за аварии одного резервуара произошла цепочка разрушений еще 5 резервуаров и возникла реальная угроза соседним объектам, так как пожар распространился по фронту более чем на 1 км. Ущерб составил 16,7 млн. рублей [63, 85, 100].



Рисунок 16 – Пожар на НПЗ в Башкирии

В России за год в среднем происходит 8-10 пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах. По результатам анализа пожаров за 1970-1990 гг. частота пожаров в расчете на резервуар за год составила:

- резервуар со стационарной крышей –  $1,86 \cdot 10^{-4}$  (1 пожар за 5000 лет);
- резервуар с плавающей крышей (РВСПК) –  $1,29 \cdot 10^{-4}$  (1 пожар за 8000 лет);
- резервуар с понтоном (РВСП) –  $4,53 \cdot 10^{-4}$  (1 пожар за 2000 лет).

Наиболее крупными, с уничтожением резервуара, группы резервуаров или резервуарного парка (РП), большой продолжительностью тушения или гибелью людей являются следующие:

- РВСП-5000 на Комсомольском НПЗ, 1981 г., тушили 48 часов;
- РВСПК-10000 на Московском НПЗ, 1985 г., тушили 18 часов;
- РВС-10000 на Киришском НПЗ, 1985 г., тушили 85 часов;
- РВСПК-50000 на линейной производственно-диспетчерской станции (ЛПДС) пос. Платина Свердловской области, 1986 г., тушили 18 часов;
- 4 РВС-20000 на нефтеперекачивающей станции (НПС) Нефтеюганска, 1990 г., уничтожены 4 РВС-20000;
- РВС-20000 на Анжеро-Судженской ЛПДС, 1995 г., тушили 17 часов;
- РП нефтегазодобывающего управления (НГДУ) «Сергиевскнефть», г. Суходол Самарской области, 2000 г., тушили 7 суток;
- РВСПК-50000 Омской ЛПДС, 2002 г., погибли 2 чел., тушили 9 часов;
- РВС-20000 на ЛПДС в Красноярском крае, 2002 г., тушили 25 часов;
- РВС-5000 на Туапсинской нефтебазе, 2003 г., погибло 5 чел.;
- РВС-5000 в пос. Ямбург, 2003 г., погибли 2 чел., тушили более суток;
- РВС-2000 на Архангельской нефтебазе, 2005 г., погибли 2 чел.;
- РВСП-5000 на Комсомольском НПЗ, 2007 г., тушили 7 часов;
- РВС-10000 на нефтебазе в Махачкале, 2008 г., тушили 25 часов;
- Группа РВС-20000 на ЛПДС «Конда» в ХМАО - Югра, Кондинский район, 2009 г., тушили 43 часа [63–64, 100].

Высокая опасность технологического процесса предприятий НХП и НПП (Рисунок 17) и риск возникновения аварий на РП усиливается и тем, что «в итоге интенсивного развития градостроительства в России, особенно за последние десятилетия, около 25 % из них оказалось в черте плотной городской застройки, большая половина располагается на возвышенных площадках по отношению к отметкам соседних объектов или имеет уклоны промышленных площадок в

сторону дорог, портов, рек и причалов. Кроме того, в целом по всей России более 60 % резервуаров в резервуарных парках на объектах хранения, переработки и транспортировки нефтехимических веществ эксплуатируется свыше 30 лет, и их износ достигает 60-80 %» [63, 100].

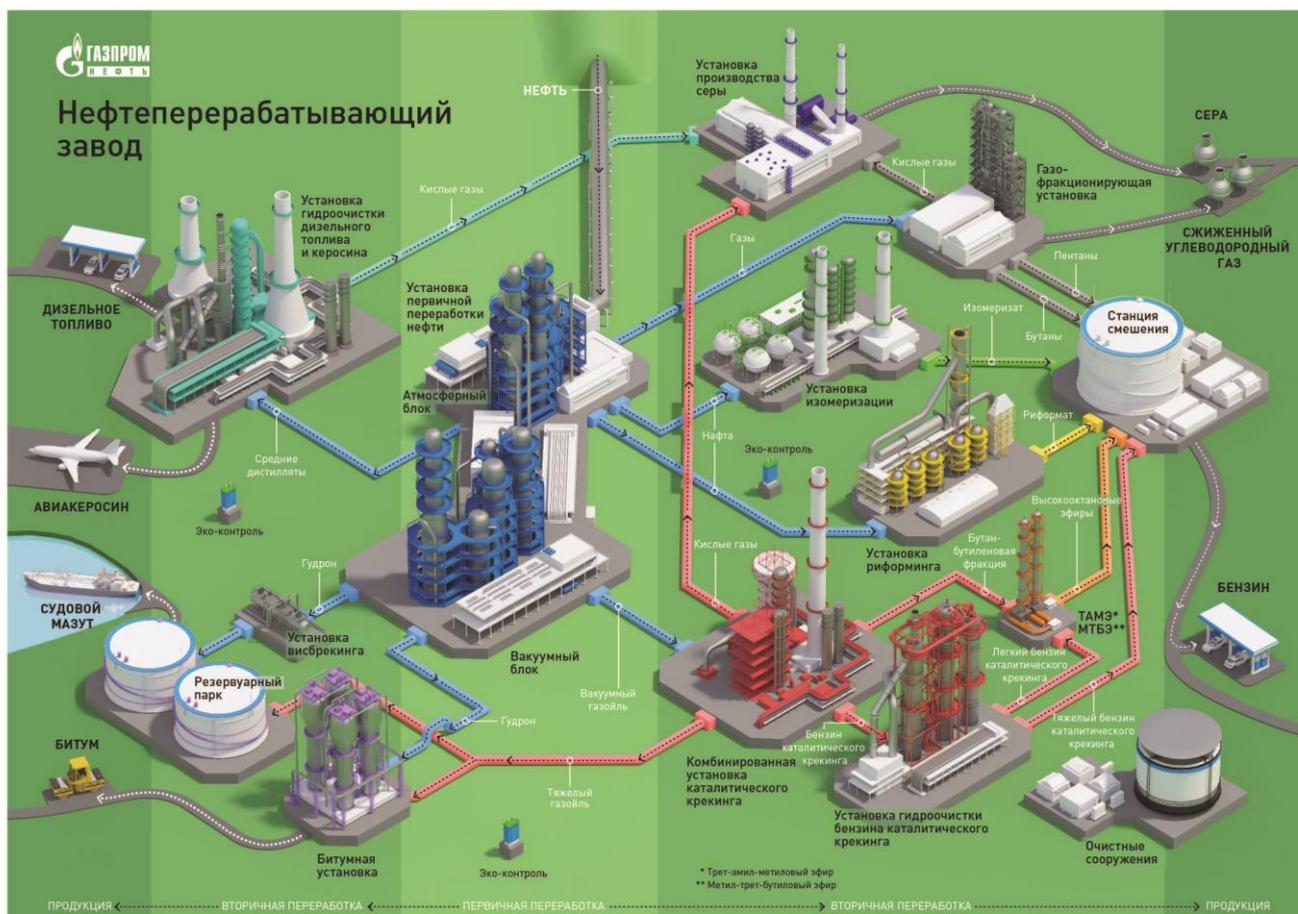


Рисунок 17 – Технологический процесс предприятия НПЗ

### 1.3 Водоснабжение комплексов предприятий нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности и проблемы оценки водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров

Одним из важных элементов системы обеспечения промышленной безопасности комплексов предприятий НХП и НПЗ является пожарная безопасность. Система обеспечения пожарной безопасности также состоит из нескольких элементов, одним из которых является противопожарное

водоснабжение. Противопожарное водоснабжение, в свою очередь, является одним из элементов системы водоснабжения рассматриваемых объектов. Вода на предприятиях НХП и НПЗ (например, нефтехимический – НХЗ или нефтеперерабатывающий завод – НПЗ) используется на производственные цели, хозяйственно-питьевые нужды, пожаротушение.

Для примера рассмотрим систему обеспечения водоснабжением НПЗ. Вода в производстве потребляется для: охлаждения нефтепродуктов; обессоливания сырой нефти; охлаждения тягодутьевых машин, компрессорных и уплотнений насосов; промывки нефтеаппаратуры перед ее ревизией и ремонтом; приготовления растворов реагентов; смыва полов в производственных помещениях и мощеных территориях аппаратных дворов. Для обессоливания и охлаждения используется оборотная вода, а для приготовления различных реагентов – только свежая вода из пресноводных водоемов. Для производственных нужд лабораторий применяют воду только питьевого качества. Расход воды на производственное водопотребление будет зависеть от типа предприятия, его «возраста», состава, соответствия нормам и правилам и технического уровня эксплуатации. Расход воды на 1 тонну перерабатываемой нефти в зависимости от целей потребления и профиля НПЗ показан в Таблице 3.

Таблица 3 – Расход воды для различных целей на НПЗ

Профиль предприятия	Вода (м <sup>3</sup> на 1 тонну нефти)		
	питьевая	свежая	циркуляционная (оборотная)
Топливный	0,006-0,015	0,25-1,00	7–20
Топливо-масляный	0,012-0,024	0,60-1,75	10–30
Топливо-масляный с нефтехимическими производствами	0,02-0,035	1,6-2,7	18–40

К хозяйственно-питьевому водопотреблению относится расход воды на нужды работников предприятия (питьевой запас, вода для приготовления пищи,

для стирки, гигиенических целей). Расход питьевой воды будет зависеть от численности штатного персонала и степени оснащённости предприятия санитарными помещениями, медпунктами, столовыми и т. д. Например, для НПЗ мощностью 12 млн тонн/год расчетный расход питьевой воды составляет: 16,0 м<sup>3</sup>/ч; 130,0 м<sup>3</sup>/сут; 47 000,0 м<sup>3</sup>/год.

Число отдельных систем водоснабжения на предприятии определяется видами водопотребления. Наиболее используемыми для современных НПЗ являются системы: 1) свежей воды; 2) оборотного водоснабжения; 3) производственно-противопожарного водоснабжения; 4) хозяйственно-питьевого водоснабжения. Схема системы водоснабжения НПЗ определяется совокупностью требующихся систем водоснабжения. Принципиальная общая схема системы водоснабжения приведена на Рисунке 2.

Система свежей воды служит для таких целей, как:

- забор воды из источника водоснабжения;
- обработка воды;
- постоянная подача воды на промывку нефтепродуктов;
- приготовление реагентов;
- снабжение водой ТЭЦ, заводской котельной или когенерационной установки;
- первичное заполнение и дальнейшая подпитка производственно-противопожарной и оборотной систем водоснабжения.

Система водоснабжения (Рисунок 2) состоит из водозаборных сооружений, береговой насосной станции первого подъема, насосной станции второго подъема, очистных сооружений, кольцевой сети водопровода на территории, гидравлических трубопроводов, соединяющих насосные станции и сеть водоснабжения предприятия.

Система оборотного водоснабжения служит для многократного использования воды при поверхностном охлаждении в холодильниках

нефтепродуктов или других веществ, для охлаждения компрессорных агрегатов, тягодутьевых машин и подшипников насосов.

На НПЗ предусматривают следующие системы оборотного водоснабжения:

– система 1 – для аппаратов, которые охлаждают или конденсируют продукты при нормальном или аварийном состоянии при атмосферном давлении находящиеся в жидком состоянии;

– система 2 – для аппаратов, которые охлаждают или конденсируют продукты при нормальном или аварийном состоянии при атмосферном давлении находящиеся в газообразном состоянии;

– система 2а – для охлаждения конденсаторов паровых турбин;

– система 4 – для аппаратов, в которых при нормальном или аварийном состоянии возможно загрязнение охлаждающей воды жирными кислотами и парафином;

– отдельные спецциклы проектируют для производств в которых находятся специфические вещества, загрязняющие оборотную воду (олеум, серная кислота и др.), или для производств, которые требуют оборотную воду определенного качества.

Система хозяйственно-питьевого водоснабжения применяется для подачи воды питьевого качества на питьевые нужды.

Система производственно-противопожарного водоснабжения, как правило, потребляет ливневые и очищенные производственные стоки и служит для подпитки систем оборотного водоснабжения, для подачи воды на промывку нефтеаппаратуры перед ее ремонтом и ревизией, для подачи воды на пожаротушение. Система состоит, как правило, из кольцевого водопровода с пожарными гидрантами, с резервуарами противопожарного запаса воды и повысительной насосной станцией.

Противопожарное водопотребление появляется только в случае возникновения пожара на НПЗ. Для пожаротушения могут быть использованы как свежая, оборотная вода любой системы, так и очищенные промышленные стоки.

Расход воды на тушение пожара зависит от того, где возник пожар (в помещении предприятия, на технологической установке или оборудовании, в резервуаре хранения), какой продукт горит, в каком объеме или на какой площади [9, 30–31, 53–54, 100–105].

Согласно «Ведомственным указаниям по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности» [51], в расчет для систем противопожарного водоснабжения должны приниматься два одновременных пожара на предприятии: первый – в производственной зоне, где располагаются основные перерабатывающие цеха и установки; второй – в зоне сырьевых или товарных складов (парков).

Расход воды определяется расчетом для наиболее крупной условно горящей технологической установки и (или) парка с наиболее пожароопасными веществами. В любом случае расчетный расход воды не должен быть менее:

- 1) в производственной зоне – 170 л/с для стационарных средств пожаротушения;
- 2) в зоне сырьевых или товарных парков – 200 л/с.

Таким образом, расчетный минимальный расход воды для пожаротушения НПЗ составляет 370 л/с или 1332 м<sup>3</sup>/ч. Для НПЗ топливного профиля мощностью 12 млн тонн/год расчетный расход воды на пожаротушение составляет 430 л/с или 1550 м<sup>3</sup>/ч.

Запас воды для пожарной защиты должен храниться не менее чем в двух резервуарах, расположенных у насосной противопожарного водоснабжения. Противопожарное водоснабжение НПЗ должно осуществляться, как правило, от самостоятельной системы противопожарного водопровода. Пополнение противопожарного запаса воды в резервуарах производится, в большинстве случаев, от системы технического водоснабжения [9, 18, 22, 29–30, 57, 101–105].

Основным ОТВ при тушении пожаров на предприятиях НХП и НПЗ является ВМП средней кратности, подаваемая на поверхность горючей жидкости

[13–15, 57, 63, 100–108]. Однако для получения ВМП и защиты не горящего ТО и ТУ требуется большое количество воды, основными источниками которой являются естественные и искусственные пожарные водоемы (ПВ) и системы НППВ. При разработке документов предварительного планирования действий по тушению пожаров на данные объекты, в них рассчитываются основные показатели, характеризующие условия возможной локализации и дальнейшей ликвидации возможного пожара, одним из которых является расход огнетушащего вещества. Одно из основных условий локализации пожара является следующее [106–108]:

$$Q_{\phi} \geq Q_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\phi}$  – фактический расход ОТВ;  $Q_{\text{тр}}$  – требуемый расход ОТВ.

Требуемый расход ОТВ ( $Q_{\text{тр}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{тр}} = I_{\text{мп}} \cdot \Pi_m \quad (2)$$

где  $I_{\text{мп}}$  – требуемая интенсивность подачи огнетушащего вещества, л/(с · м<sup>2</sup>), л/(с · м), л/(с · м<sup>3</sup>), данная величина находится по справочным данным [4, 106–109];  $\Pi_m$  – параметр тушения, на который осуществляется подача огнетушащего вещества ( $S_n, P_n$  – площадь и периметр соответственно), величины параметров тушения в зависимости от геометрической формы пожара рассчитываются по следующим формулам, приведенным в [4, 106–109].

Если форму пожара на расчетный момент времени определить невозможно, то параметры пожара определяются в следующей последовательности:

- определяется путь, пройденный фронтом пожара за расчетное время;
- определяется расчетная схема пожара;
- в соответствии с геометрическими формулами определяются параметры пожара.

Фактический расход огнетушащего вещества ( $Q_{\phi}$ ) определяется следующим образом:

$$Q_{\phi} = N_{cm} \cdot q_{cm} \quad (3)$$

где  $N_{cm}$  – количество технических приборов подачи огнетушащих веществ;  $q_{cm}$  – расход прибора подачи огнетушащих веществ, л/с.

Для оценки обеспеченности объекта водой для тушения пожара величину  $Q_{\phi}$  сравнивают с величиной водоотдачи водопроводной сети  $Q_{вс}$ , используя данные Таблицы 1, которую можно найти в любом издании справочника руководителя тушения пожара или справочника водоснабжения [4, 109].

Если  $Q_{\phi} < Q_{вс}$ , то считается что объект обеспечен водой и возможный пожар может быть локализован, и в дальнейшем ликвидирован. Если  $Q_{\phi} > Q_{вс}$ , то предлагаются различные варианты решения проблемы недостатка воды.

Однако данная таблица не дает полной информации для комплексной оценки водоотдачи ВС и не учитывает такие параметры как гидравлические характеристики сети НППВ, количество задействованных пожарных гидрантов, удаленность ПГ от насосной станции и от соседних ПГ, перепады высот местности и напорно-расходные характеристики (НРХ) применяемых насосов. Также стоит отметить, что традиционно «комплексные системы обеспечения промышленной безопасности (пожарные, аварийной вентиляции, факельные и т.д.) на предприятиях НХП и НПП ориентированы на противодействие минимальному по масштабам иницирующему воздействию. Их действие при возникновении крупных аварий часто неэффективно и иногда даже усиливает их развитие. А что касается систем пожаротушения (так же как и других систем обеспечения безопасности), то они рассчитываются на функционирование в условиях стандартного (так называемого расчетного) пожара. В крупных АС, которые сопровождаются взрывами, образованием осколочных полей и другими разрушительными явлениями, в подавляющем большинстве случаев выводятся из строя системы противопожарного водоснабжения и разрушаются стационарные

установки пожаротушения. Кроме того, даже уцелевшие системы противопожарного водоснабжения не могут выполнять своих функций (обеспечивать расход воды в требуемых количествах на тушение) в условиях массового пожара: в водопроводе падает давление, и стволы перестают действовать» [57, 62, 100, 110]. В существующем порядке оценки водоотдачи сети НППВ это не учитывается. Для уточнения данных параметров предлагается использовать метод расчетного моделирования системы НППВ [111–177].

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1**

Таким образом, в первой главе показана значимость предприятий НХП и непосредственно связанных с ними предприятий НПП для экономики всего мира в целом и России в частности. Также показано, что данные предприятия ввиду огромного энергооборота и большого количества запасов пожаровзрывоопасных веществ, обладают большой пожаро- и взрывоопасностью, что при АС приводит к риску развития крупных пожаров и, в результате, возникновению больших материальных потерь, человеческим жертвам и экологическому ущербу.

Представлены статистические данные о крупных пожарах и приводящих к ним АС на рассматриваемых предприятиях как в России, так и за рубежом. Ликвидация возникающих на предприятиях НХП и НПП пожаров невозможна без больших расходов воды, основным источником которой являются сети НППВ.

В настоящее время количественная оценка водоотдачи сети НППВ на стадии разработки документов оперативного планирования для определения достаточности расхода ОТВ на ликвидацию условного (расчетного) пожара на конкретном объекте происходит по данным справочников РТП и водоснабжения, в которых используются средние значения величин расходов, которые выбираются в зависимости от диаметра магистрали и давления в ВС. При этом, не учитываются гидравлические характеристики сети НППВ, ее конфигурация, количество задействуемых ПГ, возможности ВС при повреждении трубопроводов,

что приводит к завышенным прогнозам по водоотдаче. При тушении рядового пожара частного дома, квартиры, отдельно стоящей машины и других подобных объектов, где требуется для ликвидации один, два, три пожарных ствола с расходом воды не более 10-15 л/с средняя оценка водоотдачи ВС не критична, и не приведет к ситуации нехватки ОТВ. Но, если объект пожара промышленное предприятие НХП или НПП, для его тушения требуются десятки и сотни литров воды в секунду, и приблизительная оценка водоотдачи ВС может привести к критической ошибке, и, как следствие, к недостатку ОТВ для его локализации и ликвидации со всеми отрицательными последствиями.

Таким образом, объективная оценка водоотдачи сетей НППВ предприятий НХП и НПП, как в обычном режиме тушения крупного пожара, так и в аварийном (в условиях повреждения трубопроводов сетей НППВ при возникновении ЧС техногенного или природного характера в результате взрывов ТУ и ТО, землетрясений и др.) является критически важным при составлении ПТП на рассматриваемые объекты. Это, в свою очередь, требует оптимизации расчета водоотдачи систем водоснабжения, разработки для этого соответствующих адекватных расчетных моделей тупиковых и кольцевых сетей НППВ и проведения с их использованием методом расчетного моделирования оценки достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на рассматриваемых предприятиях.

В этой связи в следующей главе будут рассмотрены расчетные модели водоотдачи наиболее распространённых на предприятиях НХП и НПП кольцевых и тупиковых сетей НППВ, учитывающие конфигурацию сетей, НРХ питающих насосов, количество и порядок задействованных гидрантов и другие параметры.

## **ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ, РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ТУПИКОВЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И МЕТОД ОЦЕНКИ ДОСТАТОЧНОСТИ ИХ ВОДООТДАЧИ ПРИ ТУШЕНИИ КРУПНЫХ ПОЖАРОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **2.1 Расчетное моделирование систем наружного противопожарного водоснабжения**

Наука о законах движения, равновесия жидкостей и способах приложения этих законов к решению задач инженерной практики начала свое развитие благодаря Леонардо да Винчи, когда его трактат *Del moto e misura dell'Acqua* (О движении и мере воды) обобщил современное состояние гидравлики около 1500 года.

К началу XVII века Бенедетто Кастелли сформулировал закон, который мы сейчас используем в качестве принципа непрерывности потока жидкости. Его ученик Эвангелиста Торричелли показал, что существует связь между скоростью жидкости и квадратным корнем сечения трубопровода

В начале XVIII века Исаак Ньютон разработал основные законы движения, которые послужили для дальнейшего развития гидравлики. В дополнение к ним, он разработал свой закон вязкости, который гласит, что касательное напряжение внутреннего трения пропорционально градиенту скорости.

В середине XVIII века, Даниил Бернулли и его отец Иоганн разработали множество принципов для анализа потока жидкости, и им принадлежит авторство книги *Hydrodynamica* (Гидродинамика, или записки о силах и движениях жидкостей), которая наиболее полно описывала обобщения гидравлической теории своего времени. Уравнение, приписываемое Бернулли (и многие другие

основные уравнения гидравлики), было фактически разработано Леонардом Эйлером в середине XVIII века.

В начале XVIII века Анри де Пито установил связь между статическим давлением и динамическим давлением движущейся жидкости, открыв, что разница между ними пропорциональна квадрату скорости жидкости. Многие исследователи в области гидродинамики к тому времени уже поняли, что для перемещения жидкостей требуется энергия. Антуан Шези был первым, кто расширил эту идею, чтобы показать, что потеря напора жидкости пропорциональна квадрату скорости. Все последующие уравнения потерь напора в турбулентном потоке связаны с его работой.

К 1840 году Генрих Людвиг Готтхильф Хаген и Жан Луи Мари Пуазёйль уточнили аналитическое уравнение для прогнозирования потери напора в ламинарном потоке. Эта работа и уравнение Антонио Шези были объединены в уточненной формуле Юлиуса Вейсбаха и Анри Дарси около 1845 года.

Другие уравнения потерь напора, более применимые к открытому каналу, а не к замкнутому потоку, были разработаны Пьером Базином и Вильгельмом фон Треттером в начале XIX века и дополнены Робертом Мэннингом в конце XIX века.

В 1883 году Осборн Рейнольдс исследовал различные режимы течения и смог четко определить различие между ламинарным и турбулентным потоками. Он также определил безразмерное число, которое используется для характеристики различных типов потока.

Хотя уравнение Дарси-Вейсбаха можно было использовать для определения потерь напора в трубопроводах, определить коэффициент трения было трудно. Генри Уильямс и Аллен Хейзен (1906 г.) разработали уравнение потери напора в гладком турбулентном потоке с C-фактором вместо коэффициента трения. Поскольку C-фактор значительно более постоянен и прост в использовании, последовало широкое использование уравнения Хейзена-Уильямса.

Решение задачи для определения скорости потока, расхода и напора в реальной системе распределения воды включает в себя решение тысяч одновременных нелинейных уравнений. До появления компьютерных технологий и расчетного моделирования такие расчеты были невозможны. Тем не менее, инженеры начала XX века смогли спроектировать и проанализировать гидравлическую модель функционирующей системы распределения воды, используя комбинацию упрощений, эмпирических правил и ограничений. Возможности инженеров по построению систем водоснабжения все еще превышали возможности специалистов того времени по их анализу, проектированию и расчету.

Джон Фримен разработал графический метод решения задач с параллельными трубами в конце XIX века, а эквивалентные методы расчета трубопроводов были использованы для разложения сложных задач в начале XX века. Тем не менее, циклические системы требовали утомительных итерационных систем и интенсивного использования логарифмических правил.

Харди Кросс в 1936 году в Университете Иллинойса разработал систематический табличный метод для расчета гидравлической системы. Этот кодифицированный последовательный процесс итерационных процедур вычисления по-прежнему используется для различных вычислений распределения потоков.

Первые компьютерные решения задач моделирования трубопроводных сетей были выполнены на аналоговых компьютерах, с использованием электрических элементов. Аналитическая модель для исследования потоков распределения воды была использована на таких компьютерах в 1950-1970-х годах для того, чтобы симитировать подачу воды. Применение моделей гидравлического анализа получило распространение с появлением настольных компьютеров.

Программное обеспечение моделирования систем водоснабжения помогает определять расходы воды и напоры в системе, выбирать оптимальные размеры

трубопроводов. Оптимальное проектирование систем водораспределения является математически сложной задачей, и подготовлены сотни статей и докладов, в которых предлагаются различные методы оптимизации систем водоснабжения.

Последние достижения в области гидравлического анализа были сосредоточены на интеграции моделирования с источниками геопространственных данных. Это сделало моделирование менее трудным для специалистов, чтобы создать чрезвычайно точные, подробные модели с минимумом затрат ручного труда, и численные данные теперь могут быть легко разделены по водопотребителям всей сети системы водоснабжения на местности.

Расчетное моделирование потокораспределения систем водоснабжения было впервые использовано для гидравлического анализа трубопроводных сетей (и стало одним из самых распространенных методов для решения подобных задач) и по аналогии работают множество других компьютерных программ [178].

Расчетное моделирование в настоящее время окончательно обретает статус третьего пути человеческого познания окружающего мира и процессов, происходящих в нем, наряду с теоретическими и экспериментальными исследованиями. Его стремительное развитие в начале XXI века происходит в результате воздействия трех основных групп факторов:

- появляются новые актуальные практические задачи, в том числе междисциплинарные, обратные и оптимизационные, требующие экстремальных ресурсов;
- учеными открываются новые законы теоретической и вычислительной математики по созданию и обоснованию современных моделей объектов разного уровня сложности и эффективных алгоритмов, описывающих их функционирование и определяющих интерпретацию получаемых данных;
- развиваются высокопроизводительные компьютерные программируемые технологии на базе бурно прогрессирующих многопроцессорных вычислительных систем [119, 123, 125, 128, 170, 179].

Моделирование используется в самых разнообразных областях научного знания для проведения компьютерных экспериментов, начиная с гуманитарных (исторические, философские, социальные и т.д.) заканчивая техническими (электротехнические, механические, биотехнологические и т.п.) науками.

Использование моделирования как метода изучения явлений и процессов окружающей действительности, дает существенные преимущества, в сравнении с проведением натурного эксперимента.

Основные преимущества расчетного моделирования заключаются в:

- универсальности (может применяться для аналогичных процессов и явлений, описываемых одинаковым математическим аппаратом);
- экономичности (не используются ресурсы реальной системы на организацию эксперимента);
- возможности моделирования опасных и критических режимов работы системы, труднопроизводимых на реальных объектах (взрыв, пожар, нарушение технологического цикла, повреждение элементов системы и т.д.);
- возможности оперативно менять параметры математического аппарата, тем самым изменяя условия эксперимента (коэффициенты, характеристики элементов системы, внутренние и внешние воздействия на систему и т.п.).

Расчетное моделирование системы НППВ включает в себя:

- определение типа сети НППВ (кольцевая, тупиковая);
- определение количества ПГ, расположенных на рассматриваемой сети НППВ и задействуемых при выбранной схеме развертывания сил и средств;
- определение гидравлических характеристик сети НППВ;
- определение НРХ насосов, установленных в НС, обслуживающей данную сеть НППВ;
- математическое описание процесса течения жидкости по трубопроводам сети НППВ с учетом заданных параметров и определение граничных условий для элементов системы НППВ.

## 2.2 Расчетная модель течения жидкости

Математическая (расчётная) модель – приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики, по определению [180] является необходимым элементом для математического моделирования рассматриваемого объекта, в данном случае – системы НППВ.

Для моделирования напорного течения жидкости на участке трубопровода сети НППВ приняты следующие допущения:

а) жидкость несжимаемая, обладающая плотностью  $\rho$  и кинематической вязкостью  $\nu$ ;

б) потери давления из-за трения при течении подчинены закону Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p = A Q^2 \pm \rho g \Delta H, \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент гидравлического сопротивления,  $\text{кг/м}^7$ ;  $Q$  – расход воды на данном участке,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho \approx 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $\Delta H$  – перепад высот на границах участка, м; если начало участка ниже его конца, то в формуле ставится «+», в противном случае – «-».

Коэффициент гидравлического сопротивления учитывает линейные и местные гидравлические потери на участке трубопровода между отводами и в отводе и может быть определен из выражения:

$$A = 0,5 \rho \sum_{i=1}^n \frac{\xi_{li} + \xi_{mi}}{F_i^2}, \quad (5)$$

где  $n$  – количество отрезков трубопровода, образующих рассматриваемый участок сети НППВ;  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости ( $\rho_{\text{воды}} \approx 1000 \text{ кг/м}^3$ );  $\xi_{li}$  – коэффициент линейного сопротивления на  $i$ -ом отрезке трубопровода;  $\xi_{mi}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений на  $i$ -ом отрезке трубопровода;  $F_i$  – площадь проходного сечения трубопровода на  $i$ -ом отрезке трубопровода,  $\text{м}^2$ .

Коэффициент линейного сопротивления для круглых труб находится по выражению:

$$\xi_{\pi i} = \frac{\lambda L}{d}, \quad (6)$$

где  $L$ ,  $d$  – длина и диаметр трубопровод на  $i$ -ом отрезке;  $\lambda$  – коэффициент, зависящий от шероховатости стенок трубы и числа Рейнольдса, который может быть рассчитан по формуле Альтшуля:

$$\lambda \approx 0,11 \left( \frac{K_s}{d} + \frac{68\nu}{V} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где  $K_s$  – абсолютная эквивалентная шероховатость стенок для труб из различных материалов;  $\nu$ ,  $V$  – вязкость и скорость течения жидкости;

в) известны НРХ источников жидкости. Для повышения напора воды в ВС в НС используются основной и резервный пожарные насосы. В качестве основного принят для расчетов насосный агрегат Grundfos CR 150-3-2 со следующими характеристиками:  $Q=180$  м<sup>3</sup>/ч;  $H=80$  м.в.ст.;  $N=30$  кВт;  $\omega=2900$  об/мин. В качестве резервного предусмотрен насосный агрегат, с параметрами аналогичными основному;

г) за основу моделирования были взяты системы уравнений баланса давлений, составленные с использованием закона Дарси-Вейсбаха (4) и характеристики центробежного насоса вида:

$$p(Q) = p_n - A_n Q, \quad (8)$$

где  $p$ ,  $Q$  – текущее давление на выходе из насоса и расход насоса;  $p_n$ ,  $A_n$  – подача насоса и коэффициент сопротивления насоса;

д) источник водоснабжения и линия расположены на одинаковых уровнях, а линия представляет собой замкнутый (или разомкнутый) горизонтальный в плане трубопровод с  $N$  отводами (кольцевую или тупиковую сеть НППВ);

е) при параллельном включении  $m$  однотипных насосов их общая НРХ также имеет вид (8), но коэффициент  $A_n$  уменьшается в  $m^2$  раз; при последовательном включении значения  $A_n$  и  $p_n$  увеличиваются в  $m$  раз;

ж) течение жидкости в сети НППВ установившееся;

з) при тушении пожара по повышенному номеру водоотбор из сети на хозяйственно-питьевые нужды временно прекращается [125, 134-175].

## 2.3 Модели и методы оценки водоотдачи кольцевой и тупиковой сети наружного противопожарного водоснабжения

### 2.3.1 Модель и метод оценки водоотдачи кольцевой сети наружного противопожарного водоснабжения

Для наглядности метод расчетного моделирования водоотдачи (Рисунок 18) кольцевой сети (КС) НППВ показан на примере модели реальной наружной водопроводной КС [109] диаметром 150 мм (Рисунок 19) при условиях включения от одного до пяти ПГ.

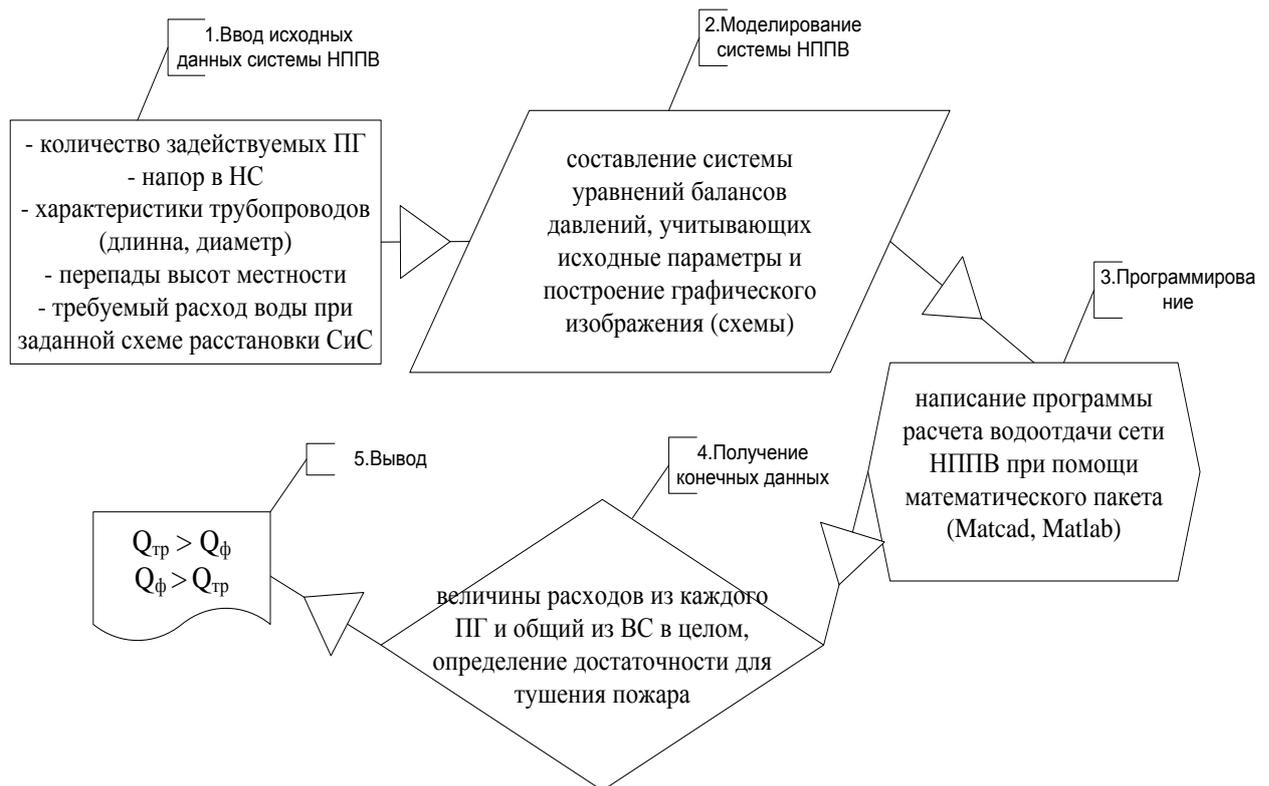


Рисунок 18 – Блок-схема процедуры метода оценки водоотдачи кольцевой сети НППВ

При построении расчётной модели КС НППВ, позволяющей оценивать ее водоотдачу  $Q_c$  в целом и водоотдачу гидрантов в частности при различных вариантах их задействования, учтены допущения а-з указанные в Главе 2 ч.2.2.

Определяем коэффициент гидравлического сопротивления ПГ по формуле (5). При диаметре труб  $d=150$  мм площадь сечения трубопровода:

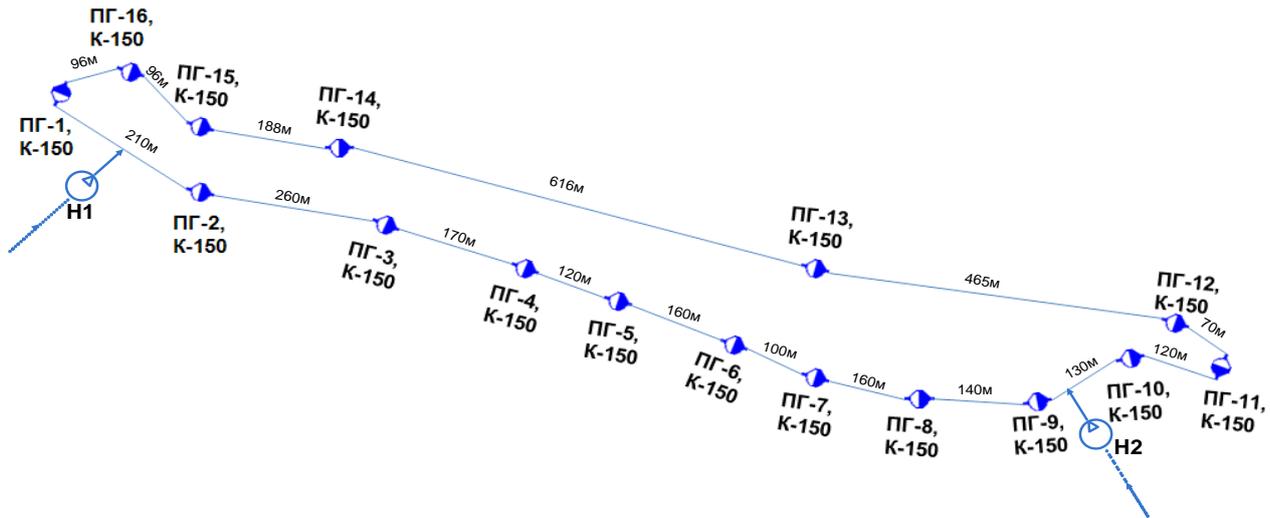


Рисунок 19 – Схема расположения пожарных гидрантов на наружной кольцевой водопроводной сети

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} = 0,018 \text{ м}^2.$$

Таким образом, коэффициент гидравлического сопротивления подземного ПГ при диаметре наружного водопровода 150 мм составляет:

$$A = 0,5 \rho \sum_{i=1}^n \frac{\xi_{ли} + \xi_{ми}}{F_i^2} = 0,5 \cdot 1000 \frac{1,2}{0,018^2} = 5,1 \cdot 10^7 \text{ кг/м}^7.$$

Коэффициент местного сопротивления для подземного ПГ на наружной водопроводной сети ( $\alpha=90^\circ$ ) по справочнику [153]  $\xi_m=1,2$ .

Определяем линейные потери на участке трубопровода по формуле (6). Коэффициент сопротивления трению на единице длины  $\lambda$  рассчитывается по формуле (7). Из Таблицы V.1 [147] для старых стальных сварных труб абсолютная эквивалентная шероховатость  $K_\varepsilon=1$ .

Для трубы диаметром 150 мм  $\lambda = 0,11 \left( \frac{1}{150} \right)^{0,25} = 0,03$ . В общем виде

$\xi_{\text{ли}} = \frac{0,03L}{0,15} = 0,2L$ . Таким образом, подставив полученные значения в (5), получим

выражение для коэффициента сопротивления участка при диаметре трубопровода 150 мм:

$$A_{\text{участка}} = 3,3 \cdot 10^5 (6+L) \quad (9)$$

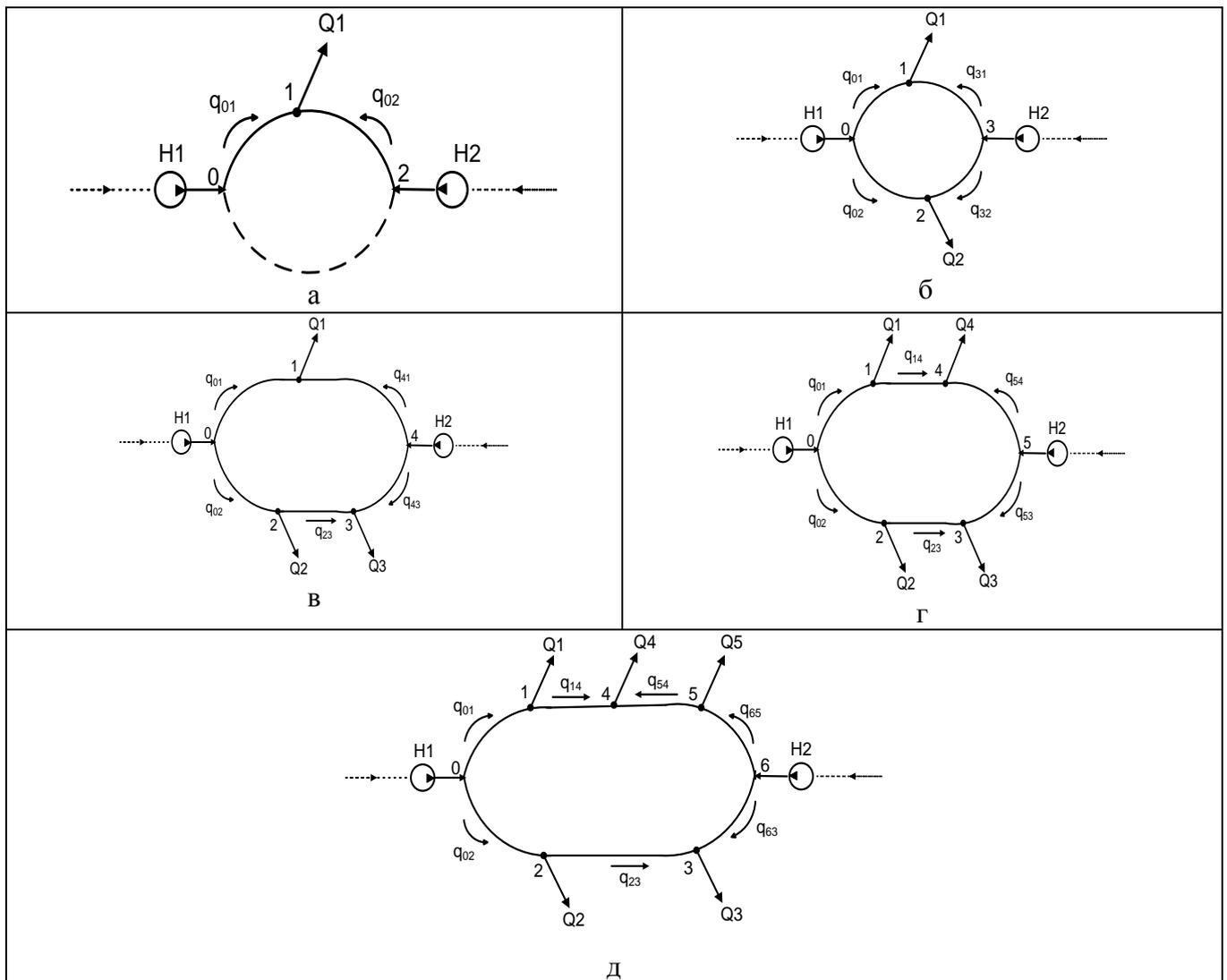


Рисунок 20 – Расчетные модели кольцевой сети НППВ при задействовании ПГ от одного до пяти (а – один ПГ, б – 2 ПГ, в – 3 ПГ, г – 4 ПГ, д – 5 ПГ)

Для моделирования и расчета водоотдачи КС НППВ коэффициенты сопротивления участков рассчитывались по формуле (9) с учетом реальных

расстояний указанных на схеме (Рисунок 19). Полагая, что в насосной станции (Рисунок 22) используются основной и резервный насосы типа Grundfos CR (Рисунки 21, 23), перепады высот незначительны ( $\Delta h_{ij} \approx 0$ ) и гидравлические сопротивления ПГ одинаковы, для различных вариантов задействования ПГ от одного до пяти (Рисунок 20), было проведено моделирование водоотдачи модели этой сети в среде Mathcad [177] (окно программы смотрите Приложение Б и Рисунки 35, 36) путём решения уравнений, приведённых в Таблице 4. Результаты моделирования приведены в Таблице 13. Как следует из полученных результатов, данные о водоотдаче кольцевой сети НППВ, приведённые в справочнике РТП [4], являются завышенными.



Рисунок 21 – Внешний вид насоса Grundfos CR

Таким образом, методом расчетного моделирования с использованием разработанной расчетной модели кольцевой сети НППВ возможно оценивать водоотдачу как каждого отдельно взятого ПГ, так и всей рассматриваемой ВС в целом с учетом самых разнообразных параметров (диаметра магистрального трубопровода сети НППВ, количеством задействуемых ПГ, расстояний между ними и НС, перепадов высот местности, коэффициентов линейных и местных сопротивлений, НРХ насосов, применяемых в НС).

### 2.3.2 Модель и метод оценки водоотдачи тупиковой сети наружного противопожарного водоснабжения

В качестве условного примера метода расчетного моделирования водоотдачи (Рисунок 25) тупиковой сети (ТС) НППВ рассмотрим расчетную модель реальной действующей ТС, изображенную на Рисунке 24. Она имеет гидранты московского образца с диаметром труб (внутренним)  $d = 150$  мм [109].

Таблица 4 – Уравнения для моделирования водоотдачи кольцевой сети НППВ при задействовании нескольких ПГ (от 1 до 5)

Схема	Исходные уравнения	Уравнения для расчётов
Рис. 20а	$p_0 = p_{н1} - A_{н1} q_{01}^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} + q_{21})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2} q_{21}^2 + \rho g(h_{н2} - h_2)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_2 - p_1 = A_{21} q_{21}^2 + \rho g(h_1 - h_2)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{п1}(q_{01} + q_{21})^2 + (A_{н1} + A_{01})q_{01}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г1}) = A_{п1}(q_{01} + q_{21})^2 + (A_{н2} + A_{21})q_{21}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{21} > 0$ $Q_K = Q_1$
Рис. 20б	$p_0 = p_{н1} - A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} + q_{31})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = A_{п2}(q_{02} + q_{32})^2 + \rho g(h_{г2} - h_2)$ $p_3 = p_{н2} - A_{н2}(q_{31} + q_{32})^2 + \rho g(h_2 - h_3)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_3 - p_1 = A_{31} q_{31}^2 + \rho g(h_1 - h_3)$ $p_3 - p_2 = A_{32} q_{32}^2 + \rho g(h_2 - h_3)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{31})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г2}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п2}(q_{02} + q_{32})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г1}) = A_{н2}(q_{31} + q_{32})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{31})^2 + A_{31} q_{31}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г2}) = A_{н2}(q_{31} + q_{32})^2 + A_{п2}(q_{02} + q_{32})^2 + A_{32} q_{32}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{31} > 0$ $Q_2 = q_{02} + q_{32} > 0$ $Q_K = Q_1 + Q_2$
Рис. 20в	$p_0 = p_{н1} - A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} + q_{41})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{г2} - h_2)$ $p_3 = A_{п3}(q_{23} + q_{43})^2 + \rho g(h_{г3} - h_3)$ $p_4 = p_{н2} - A_{н2}(q_{41} + q_{43})^2 + \rho g(h_{н2} - h_4)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_4 - p_1 = A_{41} q_{41}^2 + \rho g(h_1 - h_4)$ $p_4 - p_3 = A_{43} q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{41})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г2}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г1}) = A_{н2}(q_{41} + q_{43})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{41})^2 + A_{41} q_{41}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г3}) = A_{н2}(q_{41} + q_{43})^2 + A_{п3}(q_{23} + q_{43})^2 + A_{43} q_{43}^2$ $\rho g(h_{г2} - h_{г3}) = A_{п3}(q_{23} + q_{43})^2 - A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{41} > 0$ $Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0$ $Q_3 = q_{43} + q_{23} > 0$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 20г	$p_0 = p_{н1} - A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} - q_{14})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{г2} - h_2)$ $p_3 = A_{п3}(q_{23} + q_{53})^2 + \rho g(h_{г3} - h_3)$ $p_4 = A_{п4}(q_{14} + q_{54})^2 + \rho g(h_{г4} - h_4)$ $p_5 = p_{н2} - A_{н2}(q_{54} + q_{53})^2 + \rho g(h_{н2} - h_5)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г2}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г3}) = A_{н2}(q_{54} + q_{53})^2 + A_{п3}(q_{23} + q_{53})^2 + A_{53} q_{53}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г4}) = A_{н2}(q_{54} + q_{53})^2 + A_{п4}(q_{14} + q_{54})^2 + A_{54} q_{54}^2$ $\rho g(h_{г1} - h_{г4}) = A_{п4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{п1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{14} q_{14}^2$ $\rho g(h_{г2} - h_{г3}) = A_{п3}(q_{23} + q_{53})^2 - A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $Q_1 = q_{01} - q_{14} > 0$

	$p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_1 - p_4 = A_{14} q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1)$ $p_5 - p_4 = A_{54} q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5)$ $p_5 - p_3 = A_{53} q_{53}^2 + \rho g(h_3 - h_5)$	$Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0$ $Q_3 = q_{23} + q_{53} > 0$ $Q_4 = q_{14} + q_{54} > 0$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис. 20Д	$p_0 = p_{H1} - A_{H1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{H1} - h_0)$ $p_1 = A_{H1}(q_{01} - q_{14})^2 + \rho g(h_{r1} - h_1)$ $p_2 = A_{H2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{r2} - h_2)$ $p_3 = A_{H3}(q_{63} + q_{23})^2 + \rho g(h_{r3} - h_3)$ $p_4 = A_{H4}(q_{14} + q_{54})^2 + \rho g(h_{r4} - h_4)$ $p_5 = A_{H5}(q_{65} - q_{54})^2 + \rho g(h_{r5} - h_5)$ $p_6 = p_{H2} - A_{H2}(q_{65} + q_{63})^2 + \rho g(h_{H2} - h_6)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_1 - p_4 = A_{14} q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1)$ $p_5 - p_4 = A_{54} q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5)$ $p_6 - p_3 = A_{63} q_{63}^2 + \rho g(h_3 - h_6)$ $p_6 - p_5 = A_{65} q_{65}^2 + \rho g(h_5 - h_6)$	$p_{H1} + \rho g(h_{H1} - h_{r1}) = A_{H1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{H1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{H1} + \rho g(h_{H1} - h_{r2}) = A_{H1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{H2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{H2} + \rho g(h_{H2} - h_{r3}) = A_{H2}(q_{65} + q_{63})^2 + A_{H3}(q_{63} + q_{23})^2 + A_{63} q_{63}^2$ $p_{H2} + \rho g(h_{H2} - h_{r5}) = A_{H2}(q_{65} + q_{63})^2 + A_{H5}(q_{65} - q_{54})^2 + A_{65} q_{65}^2$ $\rho g(h_{r1} - h_{r4}) = A_{H4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{H1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{14} q_{14}^2$ $\rho g(h_{r2} - h_{r3}) = A_{H3}(q_{23} + q_{63})^2 - A_{H2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $\rho g(h_{r5} - h_{r4}) = A_{H4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{H5}(q_{65} - q_{54})^2 + A_{54} q_{54}^2$ $Q_1 = q_{01} - q_{14} > 0$ $Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0$ $Q_3 = q_{23} + q_{63} > 0$ $Q_4 = q_{14} + q_{54} > 0$ $Q_5 = q_{65} - q_{54} > 0$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$
Примечания: $h_i, h_{ri}$ – высоты $i$ -го узла сети и $i$ -го ПГ		



Рисунок 22 – Вид насосной станции

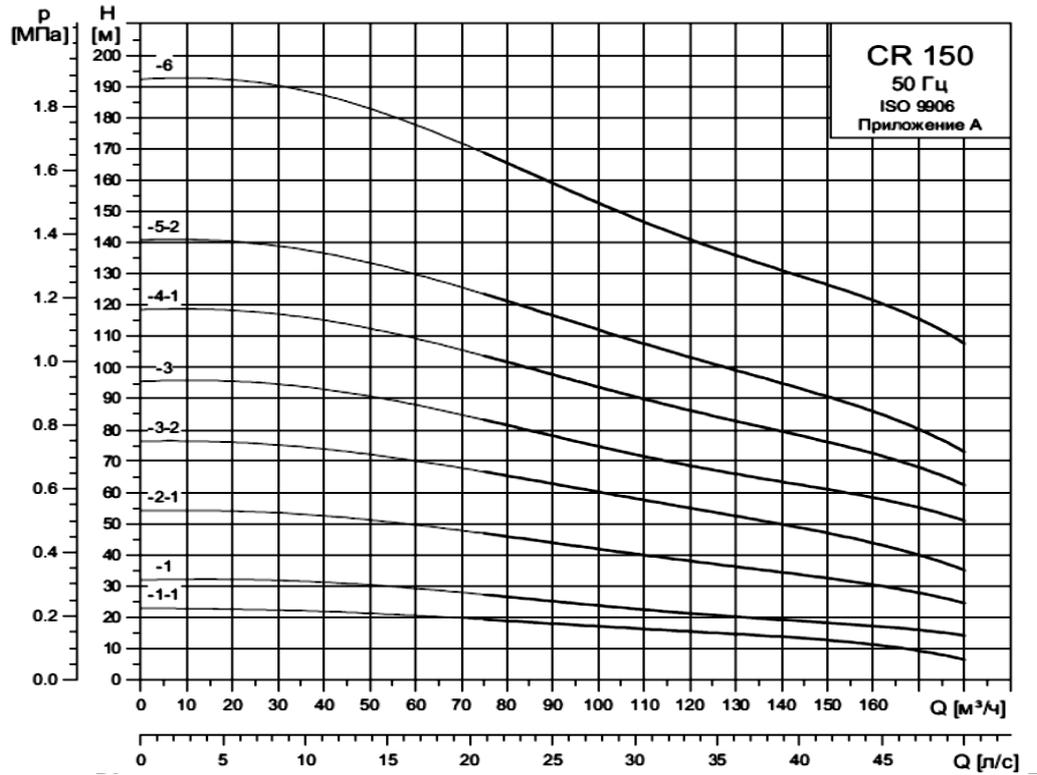
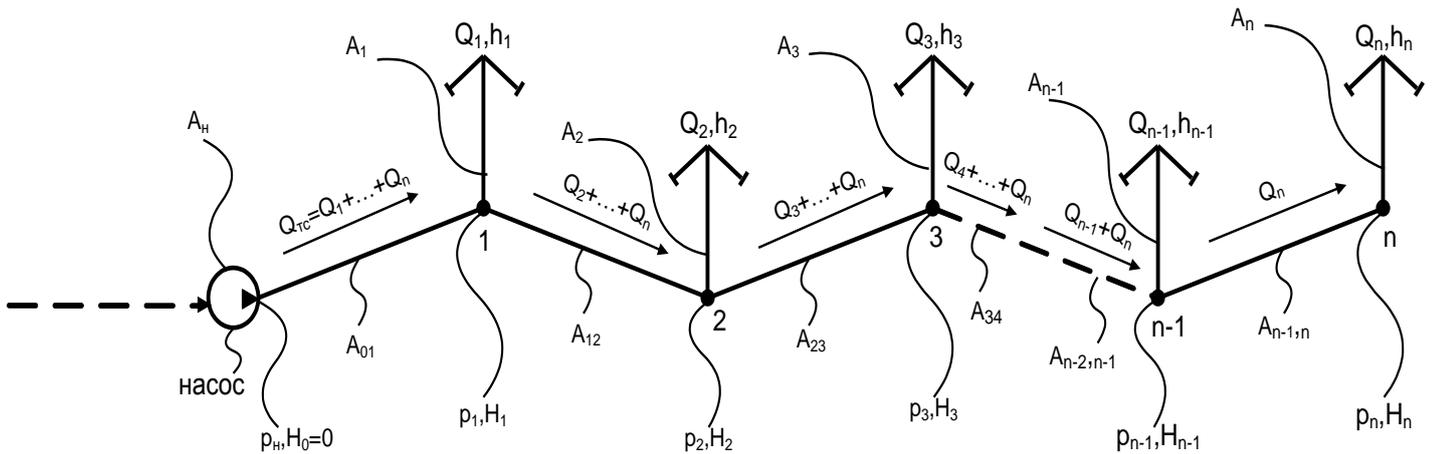


Рисунок 23 – НРХ насосов Grundfos CR

Рисунок 24 – Расчетная модель тупиковой сети НПВ с  $n$  гидрантами

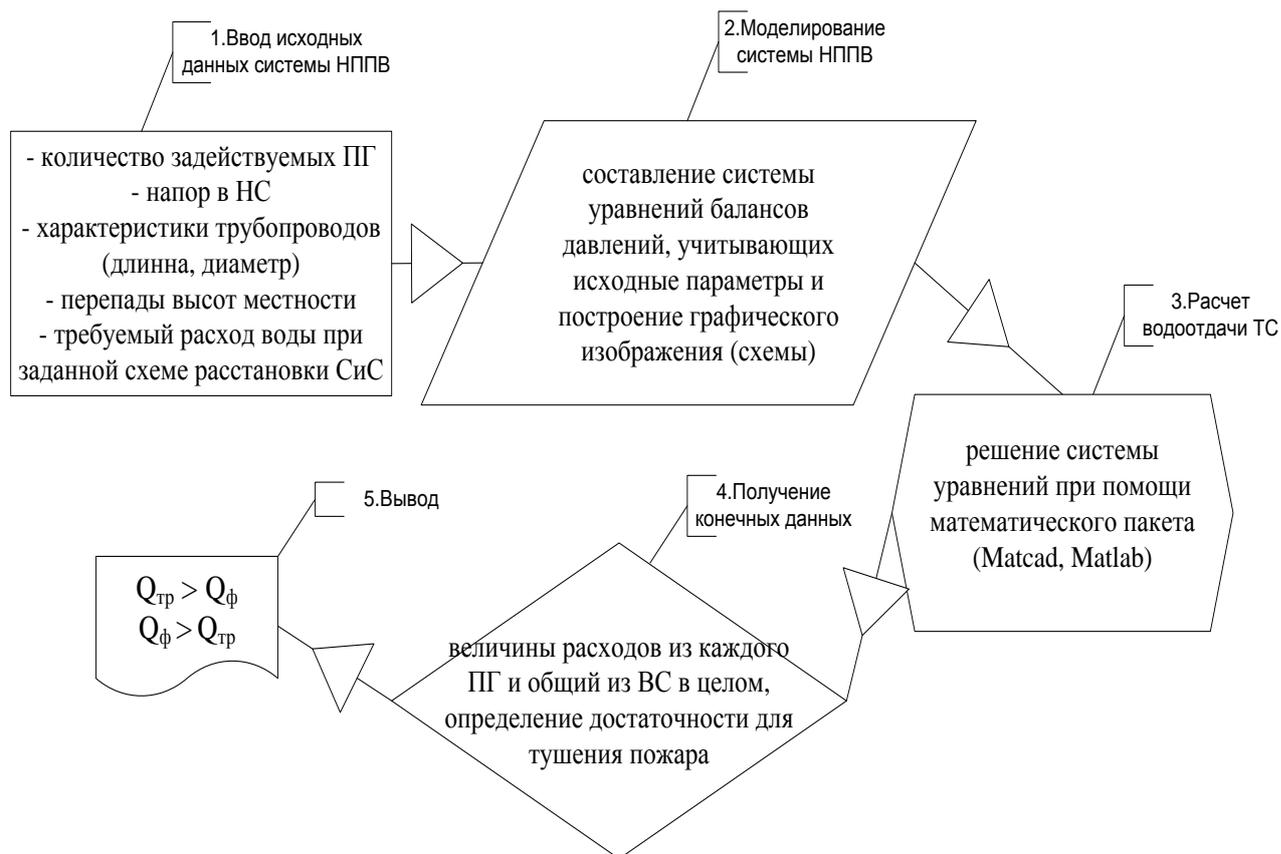


Рисунок 25 – Блок-схема метода оценки водоотдачи тупиковой сети НППВ

При тушении пожара по повышенному номеру «Расписанием выезда...», разрабатываемым в соответствии с приказом МЧС России [181], предусматривается прибытие значительных сил и средств (СиС) пожарной охраны (ПО), что предполагает установку автоцистерн (АЦ) на несколько гидрантов данной сети НППВ. В связи с этим оценка водоотдачи сети  $Q_c$  в целом и водоотдачу гидрантов в частности при различных вариантах их задействования представляет большой практический интерес. Водоотдача  $Q_c$  такой сети согласно справочных данных при различных напорах  $H$  приведена в Таблице 1 [4, 109].

С учетом допущений «а»–«з» указанные в Главе 2 ч.2.2. и на основе баланса давлений применительно к ТС (Рисунок 24) можно записать (обозначения на Рисунке):

$$p_n - (A_n + A_{01}) \left( \sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 = \rho g H_1; \quad (10)$$

$$p_i = A_i Q_i^2 + \rho g (h_i - H_i), \quad i = 1, \dots, n; \quad (11)$$

$$p_{i-1} - p_i = A_{i-1,i} \left( \sum_{j=i}^n Q_j \right)^2 + \rho g (H_i - H_{i-1}), \quad i = 2, \dots, n; \quad (12)$$

где  $A_i = A_{г.к}$  — коэффициент сопротивления гидранта с колонкой;  $A_i = A_{г.к} \approx 5,1 \cdot 10^7$  кг/м<sup>7</sup>;  $h_i$  — высота патрубка колонки на  $i$ -м гидранте, м;  $H_i$  — высота залегания отвода в  $i$ -й гидрант, м (высоты отсчитываются от уровня насоса).

Для решения задачи оценки водоотдачи ТС  $Q_c$  через нахождение значений расходов  $Q_1, \dots, Q_n$  (очевидно, что  $Q_c = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$ ) выражения (10)–(12) желательно представить в виде системы из  $n$  нелинейных алгебраических уравнений:

$$p_n - (A_n + A_{01}) \left( \sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 - A_1 Q_1^2 - \rho g h_1 = 0; \quad (13)$$

$$A_{i-1} Q_{i-1}^2 - A_i Q_i^2 + \rho g (h_i - h_{i-1}) - A_{i-1,i} \left( \sum_{j=i}^n Q_j \right)^2, \quad i = 2, \dots, n. \quad (14)$$

Аналитическое решение уравнений (13) и (14) возможно только в частных случаях, когда  $n=1$  и  $n=2$ . При задействовании только одного ПГ ( $n = 1$ ) величина  $Q_c = Q_1$  находится из выражения

$$Q_1 = \left( \frac{p_n - \rho g h_1}{A_n + A_{01} + A_{г.к}} \right)^{0,5}. \quad (15)$$

При  $n = 2$  решение уравнений (37) и (38) принимает достаточно громоздкий вид (здесь не приводится), а при  $n > 2$  решение производится численными методами с использованием известных компьютерных программ [177].

Тем не менее, интерес представляет частный случай, когда рельеф местности ровный и перепадами высот можно пренебречь. В этом случае система уравнений (11) и (12) упрощается:

$$p_n - (A_n + A_{01}) \left( \sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 - A_1 Q_1^2 = 0; \quad (16)$$

$$A_{i-1} Q_{i-1}^2 - A_i Q_i^2 - A_{i-1,i} \left( \sum_{j=i}^n Q_j \right)^2, \quad i = 2, \dots, n \quad (17)$$

При допущении, что коэффициенты  $A_1 = A_2 = \dots = A_n$  соответствуют коэффициенту сопротивления гидранта с колонкой  $A_{г.к} \approx 5,1 \cdot 10^7 \text{ кг/м}^7$ , система уравнений (16)–(17) имеет аналитическое решение, которое можно представить в рекуррентном виде:

$$Q_1 = \left( \frac{P_H}{A_{г.к} + (A_H + A_{01})B_1^2} \right)^{0,5}; \quad (18)$$

$$Q_{i+1} = Q_i(B_i - 1)/B_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n - 1; \quad (19)$$

$$B_i = 1 + \frac{B_{i+1}}{(1 + B_{i+1}^2 A_{г.к} / A_{г.к})^{0,5}}, \quad i = 1, \dots, n - 1; B_n = 1, \quad (20)$$

где  $\{B\}$  – условные безразмерные коэффициенты.

Решение системы уравнений (18)–(20) осуществляется в следующем порядке. Сначала по выражениям (20) вычисляются коэффициенты  $\{B_i\}$ , начиная с  $B_{n-1}$  до  $B_1$ . Далее по выражению (18) рассчитывается расход  $Q_1$  гидранта, ближайшего к насосной станции, а затем по выражениям (19) — остальные расходы, начиная с  $Q_2$  до  $Q_n$ . Конкретные выражения для различного числа гидрантов  $N$  приведены в Таблице 5.

Таблица 5 – Выражения для расчета величин расходов из гидрантов ТС

$N$	$\{B_i\}$	$\{Q_i\}$
2	$B_2 = 1; B_1 = 1 + (1 + A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$
3	$B_3 = 1; B_2 = 1 + (1 + A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_1 = 1 + B_2(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_3 = Q_2(1 + A_{23}/A_{г.к})^{-0,5}$
4	$B_4 = 1; B_3 = 1 + (1 + A_{34}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_2 = 1 + B_3(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_1 = 1 + B_2(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_3 = Q_2(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_4 = Q_3(1 + A_{34}/A_{г.к})^{-0,5}$
5	$B_5 = 1; B_4 = 1 + (1 + A_{45}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_3 = 1 + B_4(1 + B_4^2 A_{34}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_2 = 1 + B_3(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_1 = 1 + B_2(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_3 = Q_2(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_4 = Q_3(1 + B_4^2 A_{34}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_5 = Q_4(1 + A_{45}/A_{г.к})^{-0,5}$

Примечание. Расход  $Q_1$  находится по выражению (42).

Таблица 6 – Коэффициенты  $\{A\}$  и  $\{B\}$  для различных вариантов водозабора из ТС

Вариант г	$\{A\}, 10^7 \text{ кг/м}^3$				$\{B\}$				N	
	$A_{01}$	$A_{12}$	$A_{23}$	$A_{34}$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$		
1	24,52								1	
2	12,74				1					
3	7,56	–	–	–			–	–		
4	2,74									
5	12,74	11,78				1,5497				2
6	7,56	16,96			1,4808					
7	2,74	21,78			1,4356	1				
8	7,56	5,18	–	–	1,7044			–		
9	2,74	10,00			1,5812					
10	2,74	4,82			1,7170					
11	7,56	5,18	11,78		1,8356	1,5497			3	
12	2,74	4,82	16,96		1,8448	1,4808				
13	2,74	10,00	11,78	–	1,6486	1,4356	1	–		
14	2,74	4,82	5,18		1,8807	1,7044				
15	2,74	4,82	5,18	11,78	1,8973	1,8356	1,5497	1	4	

Рассмотрим случай, когда влияние перепадов высот на водоотдачу ТС можно не учитывать и для расчета используются выражения (18)–(20). Для удобства расчетов обозначим гидранты буквами: ближайший к НС — «А», следующие — «Б» и «В», самый дальний — «Г». Варианты водозабора из гидрантов приведены в Таблице 8. Значения  $\{A\}$  и  $\{B\}$ , рассчитанные по выражениями (5-7) и (20) соответственно, приведены в Таблице 6, выражения для определения расходов  $\{Q\}$  — в Таблице 7. Результаты расчетов для различных насосов на НС и схем их включения представлены в Таблице 19.

Таким образом, методом расчетного моделирования с использованием разработанной расчетной модели тупиковой сети НППВ возможно оценивать водоотдачу как каждого отдельно взятого ПГ, так и всей рассматриваемой ВС в целом с учетом самых разнообразных параметров (диаметра магистрального трубопровода сети НППВ, количеством задействуемых ПГ, расстояний между ними и НС, коэффициентов линейных и местных сопротивлений, НРХ насосов, применяемых в НС).

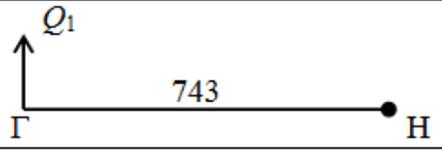
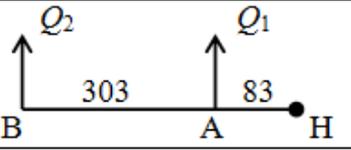
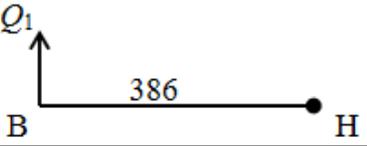
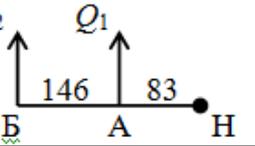
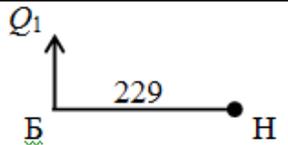
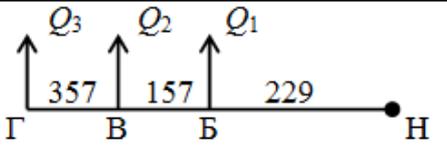
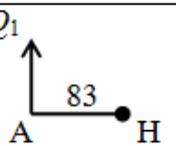
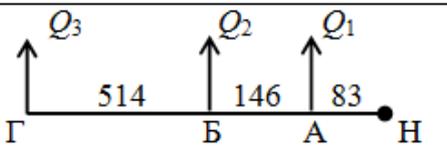
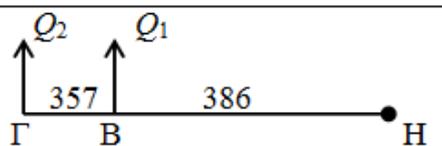
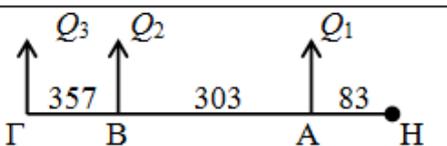
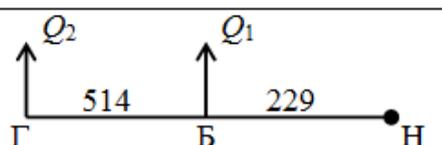
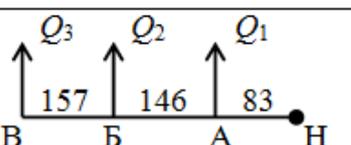
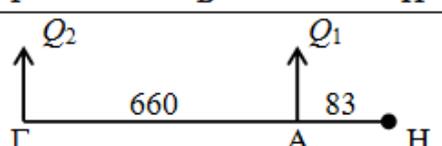
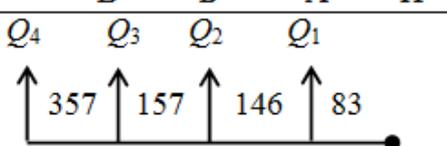
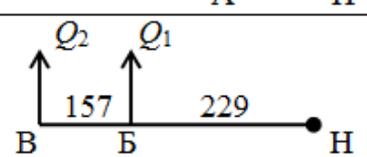
Таблица 7 – Расчетные выражения для оценки водоотдачи гидрантов ТС

Вариант	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
1	$Q_{\Gamma} = [p_{\text{н}}/(A_{\text{н}} + 34,72 \cdot 10^7)]^{0,5}$			
2	$Q_{\text{Б}} = [p_{\text{н}}/(A_{\text{н}} + 22,94 \cdot 10^7)]^{0,5}$			
3	$Q_{\text{Б}} = [p_{\text{н}}/(A_{\text{н}} + 17,76 \cdot 10^7)]^{0,5}$	0	0	0
4	$Q_{\text{А}} = [p_{\text{н}}/(A_{\text{н}} + 12,94 \cdot 10^7)]^{0,5}$			
5	$Q_{\text{Б}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 12,74 \cdot 10^7)2,4016]\}^{0,5}$	$Q_{\Gamma}=0,5497Q_{\text{Б}}$		
6	$Q_{\text{Б}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 7,56 \cdot 10^7)2,1928]\}^{0,5}$	$Q_{\Gamma}=0,4808Q_{\text{Б}}$		
7	$Q_{\text{А}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 2,74 \cdot 10^7)2,0609]\}^{0,5}$	$Q_{\Gamma}=0,4356Q_{\text{А}}$		
8	$Q_{\text{Б}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 7,56 \cdot 10^7)2,905]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,7044Q_{\text{Б}}$	0	0
9	$Q_{\text{А}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 2,74 \cdot 10^7)2,500]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,5812Q_{\text{А}}$		
10	$Q_{\text{А}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 2,74 \cdot 10^7)2,9481]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,7170Q_{\text{А}}$		
11	$Q_{\text{Б}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 7,56 \cdot 10^7) \cdot 3,3695]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,5392Q_{\text{Б}}$	$Q_{\Gamma}=0,5497Q_{\text{Б}}$	
12	$Q_{\text{А}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 2,74 \cdot 10^7) \cdot 3,4033]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,5705Q_{\text{А}}$	$Q_{\Gamma}=0,4808Q_{\text{Б}}$	
13	$Q_{\text{А}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 2,74 \cdot 10^7) \cdot 2,7179]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,4185Q_{\text{А}}$	$Q_{\Gamma}=0,5497Q_{\text{Б}}$	0
14	$Q_{\text{А}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 2,74 \cdot 10^7) \cdot 3,5369]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,5167Q_{\text{А}}$	$Q_{\text{Б}}=0,7044Q_{\text{Б}}$	
15	$Q_{\text{А}} = \{p_{\text{н}}/[5,1 \cdot 10^7 + (A_{\text{н}} + 2,74 \cdot 10^7) \cdot 3,600]\}^{0,5}$	$Q_{\text{Б}}=0,4889Q_{\text{А}}$	$Q_{\text{Б}}=0,5392Q_{\text{Б}}$	$Q_{\Gamma}=0,5497Q_{\text{Б}}$

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Таким образом, во второй главе приведены расчетные модели водоотдачи кольцевых и тупиковых сетей НППВ, адекватность которых основывается на базовых положениях напорного движения несжимаемой жидкости. Модели учитывают самые разнообразные гидравлические характеристики как сетей НППВ, такие как диаметры, шероховатость труб и перепады высот местности, так и возможности насосных станций, число и взаиморасположение задействованных пожарных гидрантов. При помощи полученных расчетных моделей можно адекватно давать оценку водоотдачи сетей НППВ с использованием метода расчетного моделирования. Получены аналитические выражения для оценки водоотдачи тупиковых сетей НППВ.

Таблица 8 – Варианты расчетных схем для оценки водоотдачи гидрантов и ТС

Вариант	Расчетная схема	$N$	Вариант	Расчетная схема	$N$
1		1	9		2
2			10		
3			11		3
4			12		
5		2	13		
6			14		
7			15		4
8			Примечания: 1. Н — насос. 2. А, Б, В, Г — гидранты. 3. Цифрами указаны расстояния, м.		

Разработанные расчетные модели сетей НППВ позволяют рассчитывать и составлять паспорта водоотдачи для действующих тупиковых и кольцевых сетей НППВ, в которых заранее оцениваются величины водоотдачи из задействованных ПГ при всех возможных вариантах расстановки на них пожарной техники с учетом влияния самых различных факторов.

Полученные расчетные модели водоотдачи сетей НППВ также могут быть использованы для решения задач как анализа, так и синтеза сетей НППВ. В первом случае объективно оценивается их водоотдача при составлении документов предварительного планирования (ПТП, ПЛАС) для предприятий НХП и НПП. Во втором – могут быть даны рекомендации по проектированию или реконструкции сетей – рациональному выбору трубопроводов, насосов и др.

Однако сложность математического аппарата (а именно – описание модели движения жидкости по трубопроводам при помощи системы нелинейных алгебраических уравнений) расчетных моделей сети НППВ приводит к необходимости использовать численные методы решения, предполагающие применение компьютерных программ. Современное состояние компьютерных технологий упрощает решение данных систем уравнений путём использования стандартных пакетов математических программ (MathCad, MatLab).

Учитывая возможность повреждения самих сетей при авариях и взрывах на предприятиях НХП и НПП, в следующей главе будут рассмотрены вопросы оценки живучести сетей при выходе из строя и блокирования каких-либо их участков. Это позволит разработать индивидуальные паспорта водоотдачи сетей и дать более объективную оценку систем противопожарной защиты предприятий НХП и НПП как в нормальных, так и в аварийных условиях, а также при необходимости выработать меры по обеспечению устойчивого противопожарного водоснабжения при тушении пожаров на данных предприятиях.

## **ГЛАВА 3. МЕТОД ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

### **3.1 Метод оценки живучести сетей наружного противопожарного водоснабжения при повреждениях участков трубопроводов на предприятиях нефтехимической промышленности**

Тушение пожаров на объектах НХП, НПП и других крупных предприятиях народного хозяйства требует больших расходов воды [63, 57, 100], в том числе на охлаждение и пенное тушение. Помимо этого, при тушении пожаров возникает проблема надежности (по [2] надежность - способность объекта (технической системы и ее компонентов) выполнять требуемые функции в заданных условиях в течение заданного периода), а следовательно, и живучести (по [2] живучесть - способность объекта (технической системы и ее компонентов) к сохранению работоспособности в условиях внешних воздействий со стороны окружающей среды, выходящих за пределы условий эксплуатации, на которые он был рассчитан) сетей НППВ, так как их износ на большинстве промышленных предприятий (в том числе НХП), построенных в Советском Союзе в 60–80-е годы XX века, к настоящему времени достигает 60 %. К причинам низкой надежности трубопроводов в городах России, кроме износа, относятся:

- низкое качество и отсутствие надежных и долговечных труб;
- низкая коррозионная устойчивость значительного числа трубопроводов (материал большинства труб – низкоуглеродистая сталь);
- несоблюдение технологии производства работ по укладке и монтажу трубопроводов в период массового строительства;
- отсутствие необходимых мер по защите от агрессивного воздействия внешней и внутренней среды при прокладке стальных трубопроводов;
- скачки давления, гидравлические удары и т. п. [182–184].

Кроме того, сети НППВ могут подвергаться негативному воздействию факторов ЧС (например, разрушающим нагрузкам при расположении сетей в сейсмически активных районах), повреждению при проводимых поблизости строительных работах и др. В работе [185] определены аналитические формулы (21)-(23) для определения интенсивности отказов труб в зависимости от диаметра, материала и давления в сети.

В частности:

- для чугунных труб получена зависимость

$$\lambda = 2,04d^{-0.6}(1+0,9P), \quad (21)$$

- стальных труб

$$\lambda = 5,6d^{-0.7}(1+0,7P), \quad (22)$$

- полиэтиленовых труб

$$\lambda = 1,7d^{-0.7}(1+0,8P), \quad (23)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов труб, 1/км·год;  $d$  – диаметр труб, мм;  $P$  – среднее рабочее давление в зоне.

Данные и результат расчёта интенсивности отказов чугунных труб согласно критериям деления системы водоснабжения на зоны равных давлений ( $P$ ) (Таблица 9) приведены в Таблице 10.

Таблица 9 – Критерии деления системы водоснабжение на зоны равных давлений

№ зоны	Диапазон давлений, м.в.с.	Среднее давление в зоне, м.в.с.
1	0-19	17,5
2	20-24	22,5
3	25-29	27,5
4	30-34	32,5
5	35-39	37,5
6	40-44	42,5
7	45-49	47,5
8	50-54	52,5
9	55-59	57,5
10	60-64	62,5

В графическом виде полученные зависимости для разных материалов труб представлены на Рисунках 26-28.

Таблица 10 – Интенсивности отказов чугунных труб

D, мм	Зона №4 (P=32,5 м.в.с)			Зона №5 (P=37,5 м.в.с)		
	Длина труб, м	Кол-во аварий в год	Интенсивность отказов, (год·км) <sup>-1</sup>	Длина труб, м	Кол-во аварий в год	Интенсивность отказов, (год·км) <sup>-1</sup>
100	63639,83	37	0,581397	188145,9	125	0,664378
150	121927,4	24	0,196838	241128,7	140	0,580603
200	85824,56	14	0,163123	247718	120	0,484422
250	6913,57	2	0,289286	31757,16	12	0,377868
300	36495,74	6	0,164403	172601	60	0,347623
400	33010,63	6	0,18176	80091,56	30	0,374571
500	11391,2	-	-	38081,3	12	0,315115
600	12147,6	-	-	38555,6	22	0,570605
700	6513,69	1	0,153523	20751,45	6	0,289136
750	3069,43	1	0,325793	14405,51	2	0,138836
900	619,88	-	-	29647,11	17	0,573412

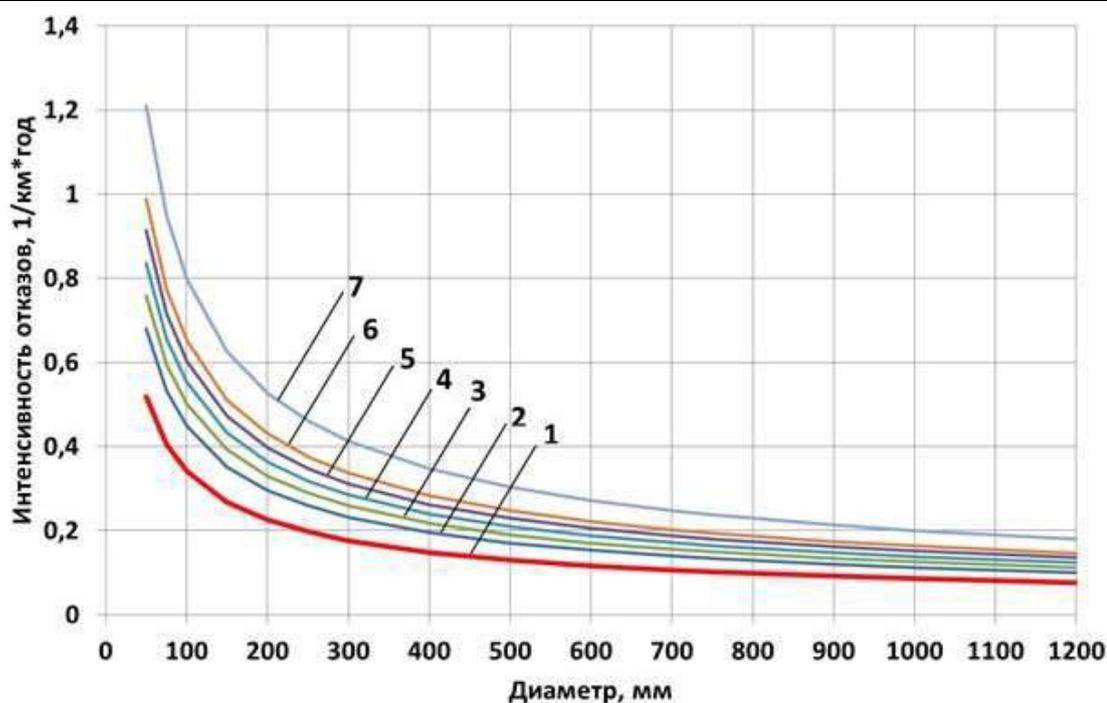


Рисунок 26 – Зависимость интенсивности отказов чугунных труб от их диаметра и давления: 1 – изменение интенсивности отказов труб при P=17,5 м.в.с.; 2 – при P=27,5 м.в.с.; 3 – при P=32,5 м.в.с.; 4 – при P= 42,5 м.в.с.; 6 - при P= 47,5 м.в.с.; 7 - при P= 62,5 м.в.с.

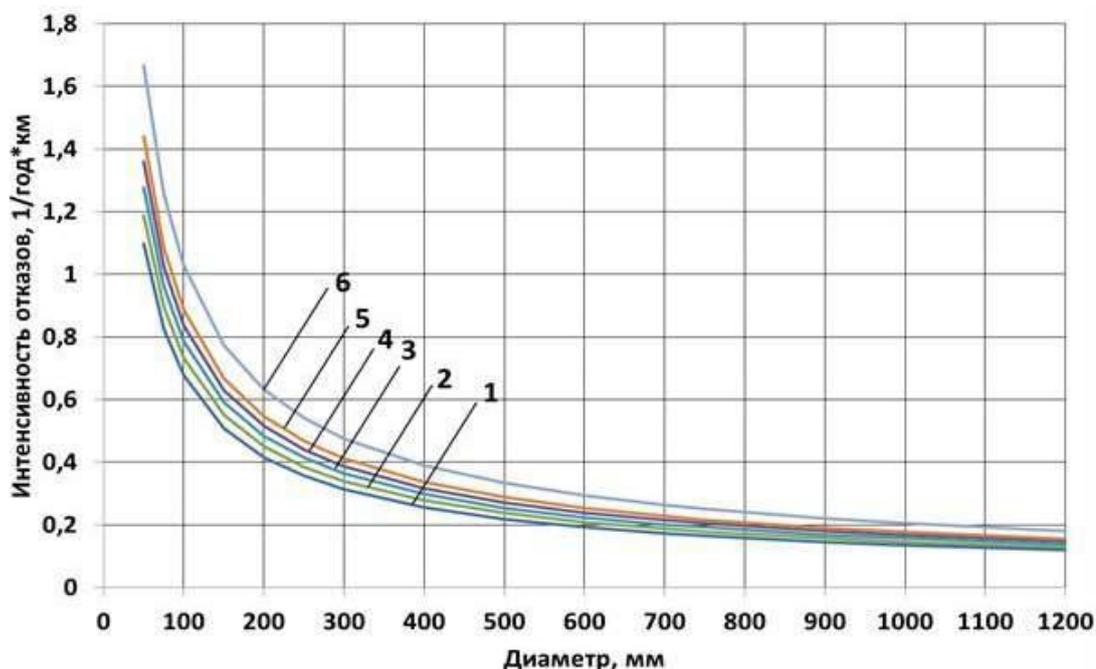


Рисунок 27 – Зависимость интенсивности отказов стальных труб от их диаметра и давления: 1 – изменение интенсивности отказов труб при  $P=17,5$  м.в.с.; 2 – при  $P=27,5$  м.в.с.; 3 – при  $P=32,5$  м.в.с.; 4 – при  $P=42,5$  м.в.с.; 5 при  $P=47,5$  м.в.с.; 6 при  $P=62,5$  м.в.с.

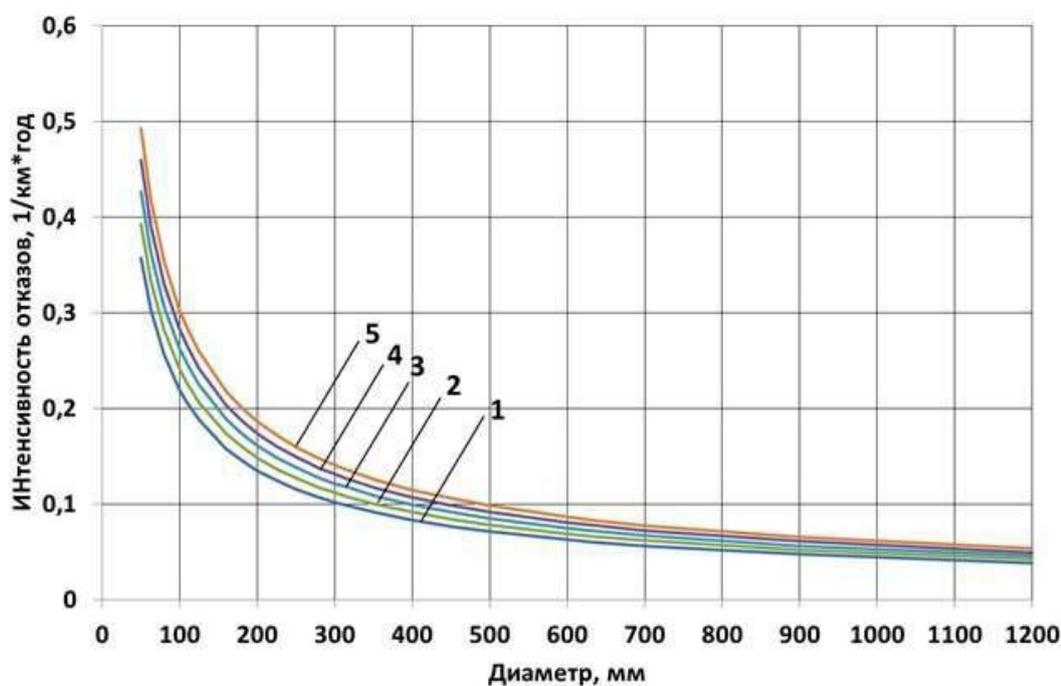


Рисунок 28 – Зависимость интенсивности отказов полиэтиленовых труб от их диаметра и давления: 1 – изменение интенсивности отказов труб при  $P=17,5$  м.в.с.; 2 – при  $P=27,5$  м.в.с.; 3 – при  $P=32,5$  м.в.с.; 4 – при  $P=42,5$  м.в.с.; 5 при  $P=47,5$  м.в.с.

Зарубежные и отечественные исследователи продолжают изучать надежность трубопроводов в течение многих десятилетий, пытаясь понять механизмы их повреждений и предложить оптимизацию эффективности затрат на их восстановление. Обычно, исследователи, в их попытке оценить уровень надежности водопроводных труб, пытаются определить количество скрытых взаимосвязей между повреждением магистрального трубопровода и особенностями эксплуатации сети водоснабжения (ее возраст, диаметр, среднее рабочее давление, агрессивность почвы, температура окружающей среды, возможные внешние воздействия и т.д.). Также для этого используются определенные поправочные коэффициенты, чтобы оценить уровень надежности системы водоснабжения.

Эти коэффициенты могут учитывать следующие параметры:

- 1) процент (время) использования системы водоснабжения;
- 2) материал магистральных трубопроводов системы водоснабжения;
- 3) качество обслуживания системы водоснабжения;
- 4) уязвимость системы водоснабжения;
- 5) надежность и риск повреждения системы водоснабжения;
- 6) устойчивость системы водоснабжения и т.д.

Согласно этим индексам анализируются все возможные профилактические действия обслуживания для предотвращения выхода из строя систем водоснабжения [184–197].

Все эти критерии помогают оценить надежность элементов системы водоснабжения, учитывая воздействие внутренних факторов, однако, не учитывают ее живучести, при воздействии внешних сил (ЧС техногенного или природного характера). При повреждении магистральных трубопроводов сети НППВ в результате ЧС, аварийные участки отсекаются задвижками, что позволяет системе водоснабжения еще какое-то время обеспечивать некоторую водоотдачу до проведения ремонта (что характерно для кольцевых сетей НППВ).

Таким образом, возникает проблема оценки живучести сети НППВ (т. е. возможности обеспечения водоотдачи ПГ при выходе из строя ее отдельных элементов, участков трубопроводов), которая может осуществляться методом (Рисунок 29) расчетного моделирования водоотдачи сетей НППВ [182].

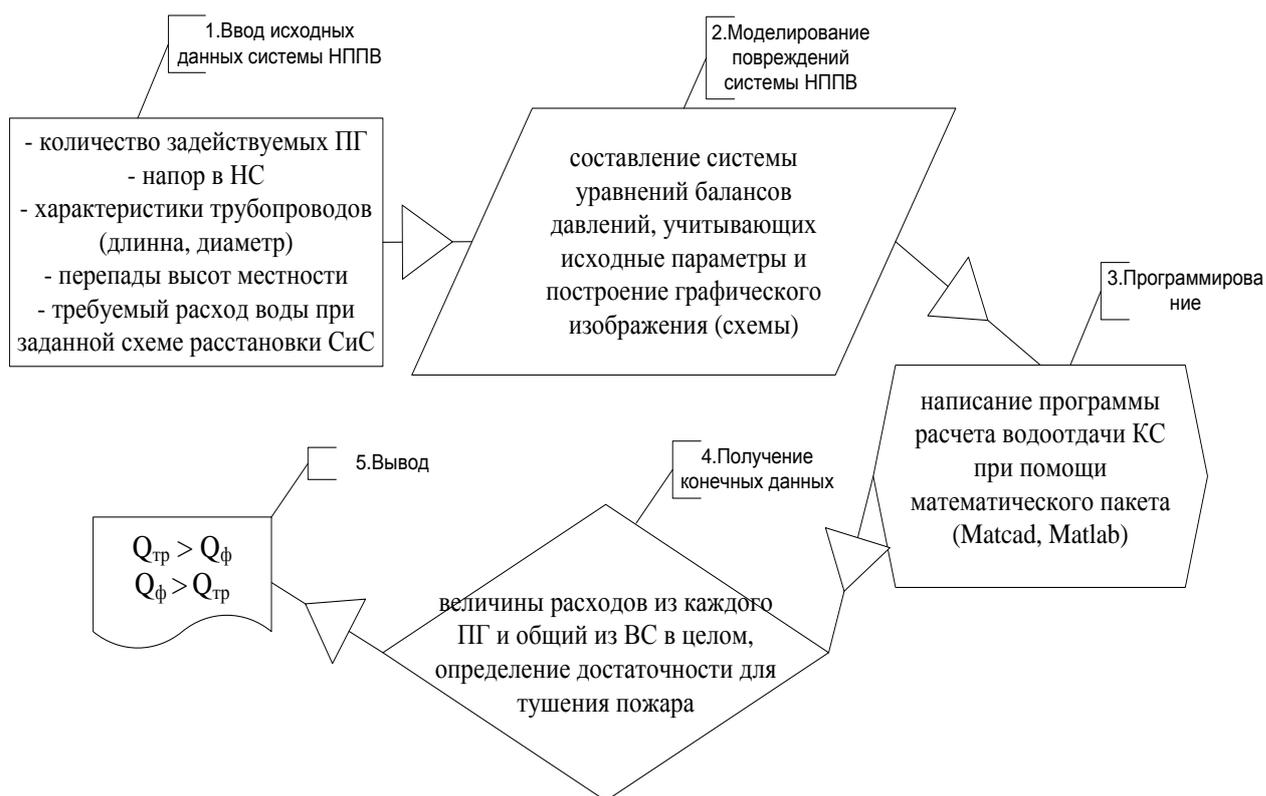


Рисунок 29 – Блок-схема процедуры метода оценки живучести кольцевой сети НППВ

За основу модели сети НППВ был взят кольцевой наружный водопровод с двумя насосными станциями. Для примера в рамках данного исследования рассмотрены варианты работы сети при различных вариантах повреждений (разрывов) трубопроводов и количестве задействованных ПГ от 2 до 4 (Рисунки 30–34). В Таблицах 11-13 приведены расчетные модели при стандартных допущениях (Глава 2 ч.2.2 а-з).

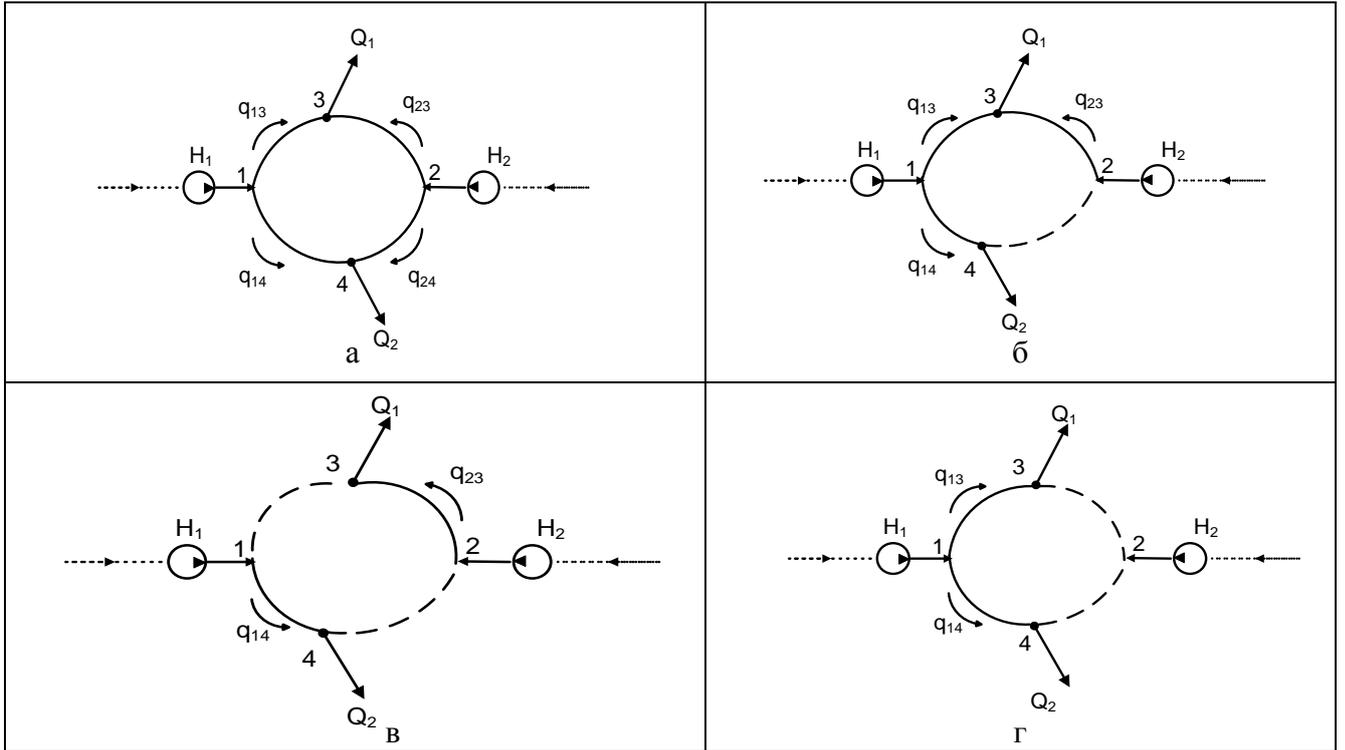


Рисунок 30 – Модели кольцевой сети с двумя ПГ ( $N = 2$ ): а – нормальный режим; б – повреждение одного трубопровода; в, г – повреждение двух трубопроводов

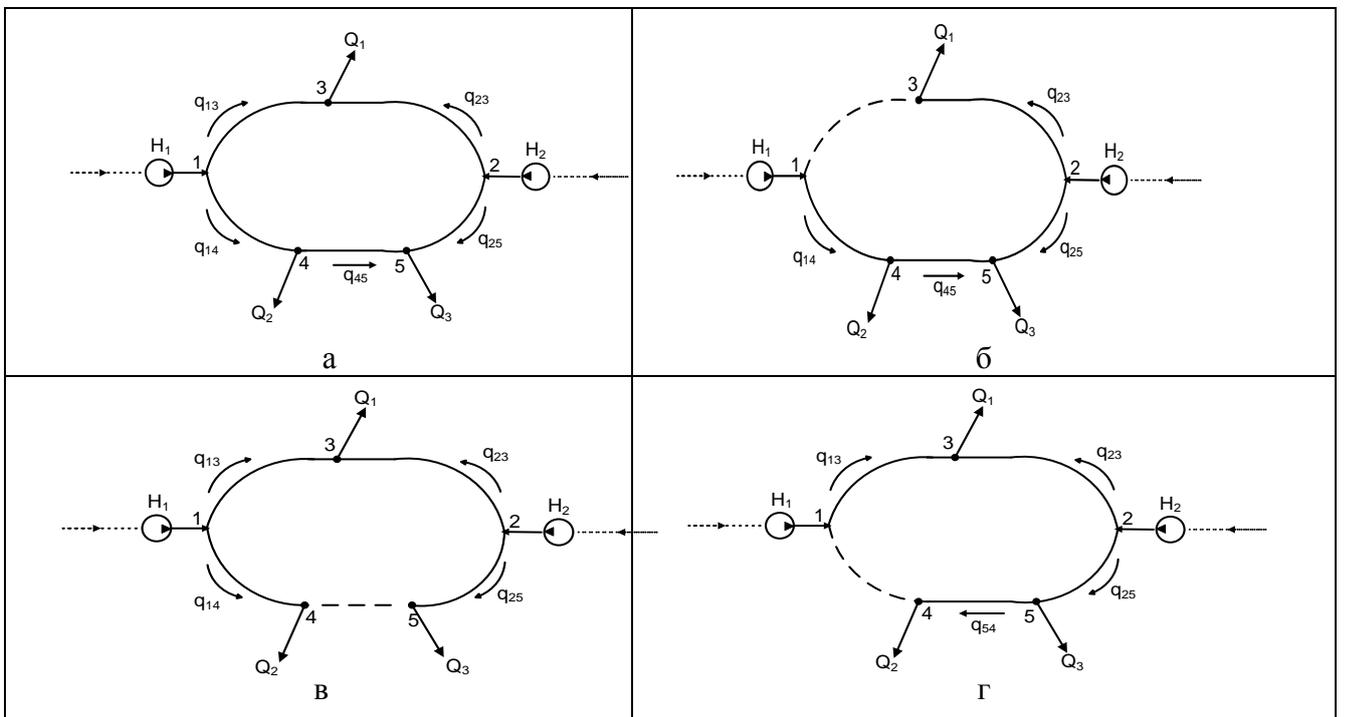


Рисунок 31 – Модели кольцевой сети с тремя ПГ ( $N = 3$ ) а – нормальный режим; б–г – повреждение одного трубопровода

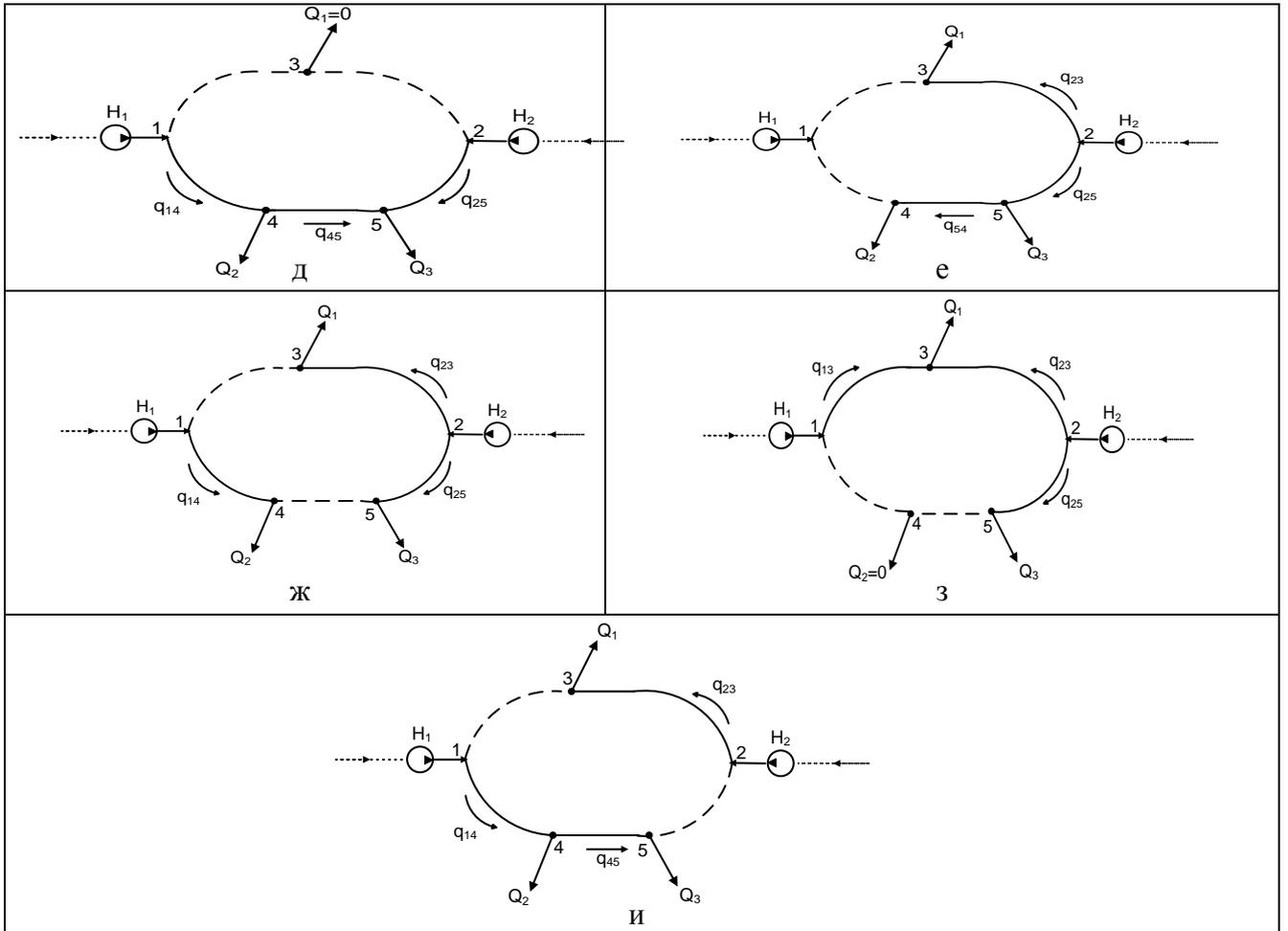


Рисунок 32 – Модели кольцевой сети с тремя ПГ ( $N=3$ ): д-и – повреждение двух трубопроводов

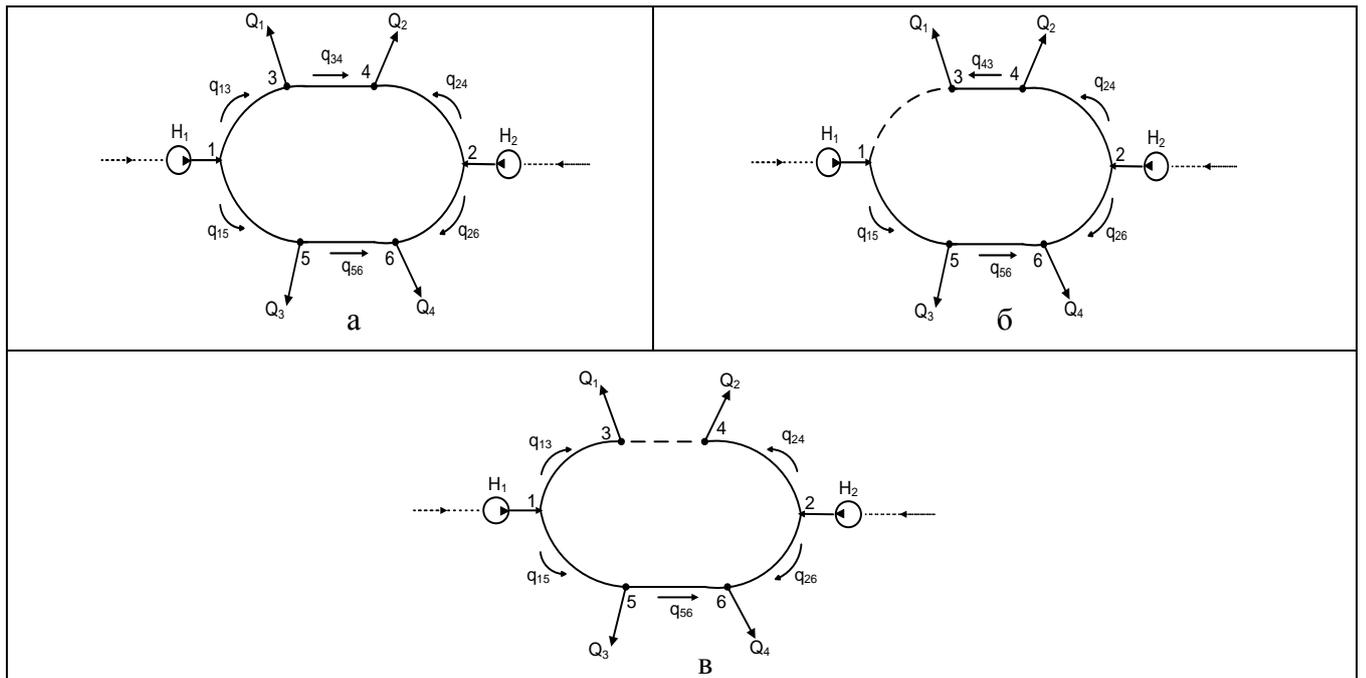


Рисунок 33 – Модели кольцевой сети с четырьмя ПГ ( $N=4$ ) по схеме «2+2»: а – нормальный режим; б, в – повреждение одного трубопровода

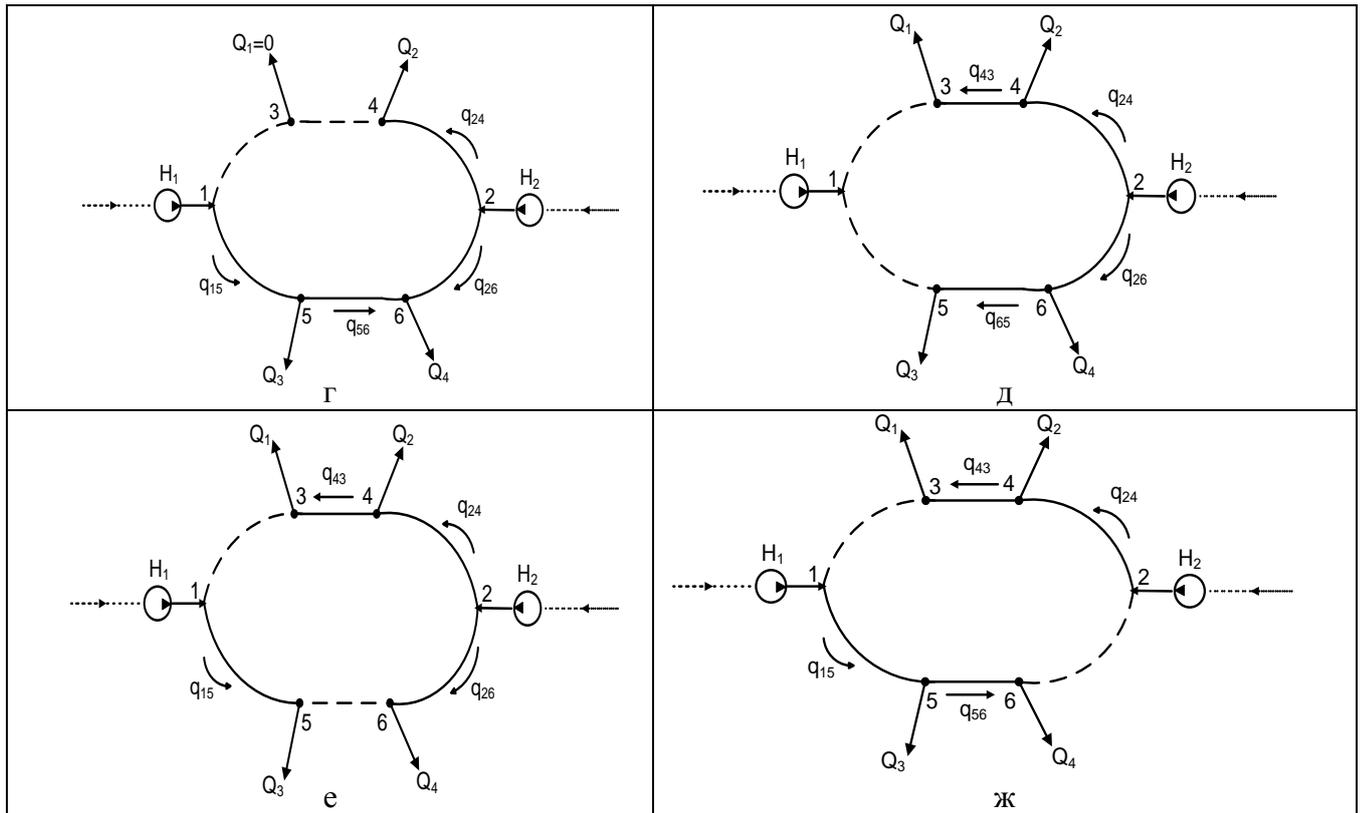


Рисунок 34 – Модели кольцевой сети с четырьмя ПГ ( $N = 4$ ) по схеме «2+2»:  
г–ж – повреждение двух трубопроводов

Таблица 11 – Выражения для моделирования водоотдачи кольцевой сети НППВ при двух задействованных ПГ ( $N = 2$ ) с учетом повреждений трубопроводов

Схема	Уравнения гидравлического баланса	Выражения для моделирования
Рис.30а	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{24})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{14} + q_{24})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{24})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_4(q_{14} + q_{24})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{24})^2 - A_4(q_{14} + q_{24})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23}; Q_2 = q_{14} + q_{24};$ $Q_K = Q_1 + Q_2$
Рис.30б	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}q_{23}^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 = (A_{14} + A_4)q_{14}^2 + \rho g(h_{г2} - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н2} - (A_{н2} + A_{23})q_{23}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $(A_{14} + A_4)q_{14}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{г2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23}; Q_2 = q_{14}; Q_K = Q_1 + Q_2$

Рис.30в	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}q_{23}^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_1 = (A_{14} + A_4)q_{14}^2 + \rho g(h_{г2} - h_1)$	Явные выражения: $Q_1 = \{[p_{н2} - \rho g(h_{г1} - h_{н1})]/(A_{н2} + A_{23} + A_3)\}^{0.5};$ $Q_2 = \{[p_{н1} - \rho g(h_{г2} - h_{н1})]/(A_{н1} + A_{14} + A_4)\}^{0.5};$ $Q_K = Q_1 + Q_2$
Рис.30г	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(Q_1 + Q_2)^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_1 = (A_{13} + A_3)Q_1^2 + \rho g(h_{г1} - h_1);$ $p_1 = (A_{14} + A_4)Q_2^2 + \rho g(h_{г2} - h_1).$	$p_{н1} - A_{н1}(Q_1 + Q_2)^2 - \rho g(h_{г1} - h_{н1}) = (A_{13} + A_3)Q_1^2;$ $Q_2 = \{[(A_{13} + A_3)Q_1^2 + \rho g(h_{г1} - h_{г2})]/(A_{14} + A_4)\}^{0.5};$ $Q_K = Q_1 + Q_2$

Таблица 12 – Выражения для моделирования водоотдачи кольцевой сети НППВ при трех задействованных ПГ ( $N = 3$ ) с учетом повреждений трубопроводов

Схема	Уравнения гидравлического баланса	Выражения для моделирования
Рис.31а	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{45} + q_{25})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{45}q_{45}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{г2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23}; Q_2 = q_{14} - q_{45};$ $Q_3 = q_{45} + q_{25}; Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис.31б	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{45} + q_{25})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - (A_{н1} + A_{14})q_{14}^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_3 + A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{45}q_{45}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{г2});$ $Q_1 = q_{23}; Q_2 = q_{14} - q_{45};$ $Q_3 = q_{45} + q_{25}; Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис.31в	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{14}^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{25}^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - (A_4 + A_{14})q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_5 + A_{25})q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23}; Q_2 = q_{14}; Q_3 = q_{25};$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Рис.31г	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}q_{13}^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_5 - p_4 = A_{54}q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{54}^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{25} - q_{54})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5)$	$p_{H1} - A_{H1}q_{13}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{25} - q_{54})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H2});$ $A_5(q_{25} - q_{54})^2 - (A_4 + A_{54})q_{54}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{r3});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23}; Q_2 = q_{54};$ $Q_3 = -q_{54} + q_{25}; Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис.32д	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}q_{25}^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$ $p_4 = A_4(q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{45} + q_{25})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5)$	$p_{H1} - A_{H1}q_{14}^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H1});$ $p_{H2} - (A_{H2} + A_{25})q_{25}^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{45}q_{45}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{r2});$ $Q_1 = 0; Q_2 = q_{14} - q_{45}; Q_3 = -q_{45} + q_{25};$ $Q_k = Q_2 + Q_3$
Рис.32е	$p_2 = p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_5 - p_4 = A_{54}q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{54}^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{25} - q_{54})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5)$	$p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_3 - A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{25} - q_{54})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H2});$ $A_5(q_{25} - q_{54})^2 - (A_4 + A_{54})q_{54}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{r3});$ $Q_1 = q_{23}; Q_2 = q_{54};$ $Q_3 = -q_{54} + q_{25};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис.32ж	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{14}^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{25}^2 + \rho g(h_{r3} - h_5)$	$p_{H1} - (A_{H1} + A_4)q_{14}^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_3 - A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_5 + A_{25})q_{25}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H2});$ $Q_1 = q_{23};$ $Q_2 = q_{14};$ $Q_3 = q_{25};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис.32з	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_5 = A_5q_{25}^2 + \rho g(h_{r3} - h_5)$	$p_{H1} - A_{H1}q_{13}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_5 + A_{25})q_{25}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23}; Q_2 = 0;$ $Q_3 = q_{25}; Q_k = Q_1 + Q_3$
Рис.32и	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}q_{23}^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$	$p_{H1} - (A_{H1} + A_{14})q_{14}^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H1});$ $p_{H2} - (A_{H2} + A_3 + A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - (A_5 + A_{45})q_{45}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{r2});$ $Q_1 = q_{23};$ $Q_2 = q_{14} - q_{45};$

$p_3 = A_3 q_{23}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4 (q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5 q_{45}^2 + \rho g(h_{r3} - h_5)$	$Q_3 = q_{45};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3$
--	---

Таблица 13 – Выражения для моделирования водоотдачи кольцевой сети НППВ при четырех задействованных ПГ ( $N = 4$ ) по схеме «2+2» с учетом повреждений трубопроводов

Схема	Уравнения гидравлического баланса	Выражения для моделирования
Рис.33а	$p_1 = p_{H1} - A_{H1} (q_{13} + q_{15})^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_3 = A_{13} q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_5 = A_{15} q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24} q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_3 - p_4 = A_{34} q_{34}^2 + \rho g(h_4 - h_3);$ $p_2 - p_6 = A_{26} q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56} q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3 (q_{13} - q_{34})^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4 (q_{34} + q_{24})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5 (q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6 (q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	$p_{H1} - A_{H1} (q_{13} + q_{15})^2 - A_3 (q_{13} - q_{34})^2 - A_{13} q_{13}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H1});$ $p_{H1} - A_{H1} (q_{13} + q_{15})^2 - A_5 (q_{15} - q_{56})^2 - A_{15} q_{15}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - A_4 (q_{34} + q_{24})^2 - A_{24} q_{24}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - A_6 (q_{56} + q_{26})^2 - A_{26} q_{26}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{H2});$ $A_3 (q_{13} - q_{34})^2 - A_4 (q_{34} + q_{24})^2 - A_{34} q_{34}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{r1});$ $A_5 (q_{15} - q_{56})^2 - A_6 (q_{56} + q_{26})^2 - A_{56} q_{56}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{r3});$ $Q_1 = q_{13} - q_{34}; Q_2 = q_{24} + q_{34};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56}; Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис.33б	$p_1 = p_{H1} - A_{H1} q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_5 = A_{15} q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24} q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43} q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_2 - p_6 = A_{26} q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56} q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3 q_{34}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4 (q_{34} + q_{24})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5 (q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6 (q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	$p_{H1} - (A_{H1} + A_{15}) q_{15}^2 - A_5 (q_{15} - q_{56})^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - A_4 (q_{24} - q_{43})^2 - A_{24} q_{24}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - A_6 (q_{56} + q_{26})^2 - A_{26} q_{26}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{H2});$ $A_4 (q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43}) q_{43}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{r2});$ $A_5 (q_{15} - q_{56})^2 - A_6 (q_{56} + q_{26})^2 - A_{56} q_{56}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{r3});$ $Q_1 = q_{43}; Q_2 = q_{24} - q_{43}; Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис.33в	$p_1 = p_{H1} - A_{H1} (q_{13} + q_{15})^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_3 = A_{13} q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_5 = A_{15} q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24} q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26} q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56} q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3 q_{13}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4 q_{24}^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5 (q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$	$p_{H1} - A_{H1} (q_{13} + q_{15})^2 - (A_3 + A_{13}) q_{13}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{H1});$ $p_{H1} - A_{H1} (q_{13} + q_{15})^2 - A_5 (q_{15} - q_{56})^2 - A_{15} q_{15}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - (A_4 + A_{24}) q_{24}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2} (q_{24} + q_{26})^2 - A_6 (q_{56} + q_{26})^2 - A_{26} q_{26}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{H2});$ $A_5 (q_{15} - q_{56})^2 - A_6 (q_{56} + q_{26})^2 - A_{56} q_{56}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{r3});$ $Q_1 = q_{13};$ $Q_2 = q_{24};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

	$p_6 = A_6(q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	
Рис.34г	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56}q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_4 = A_4q_{24}^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6(q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	$p_{H1} - (A_{H1} + A_{15})q_{15}^2 - A_5(q_{15} - q_{56})^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - (A_4 + A_{24})q_{24}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{26}q_{26}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{H2});$ $A_5(q_{15} - q_{56})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{56}q_{56}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{r3});$ $Q_1 = 0; Q_2 = q_{24};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_k = Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис.34д	$p_2 = p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43}q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_6 - p_5 = A_{65}q_{65}^2 + \rho g(h_5 - h_6);$ $p_3 = A_3q_{43}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{24} - q_{43})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{65}^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6(q_{26} - q_{65})^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	$p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_4(q_{24} - q_{43})^2 - A_{24}q_{24}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_6(q_{26} - q_{65})^2 - A_{26}q_{26}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{H2});$ $A_4(q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43})q_{43}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{r2});$ $A_6(q_{26} - q_{65})^2 - (A_5 + A_{65})q_{65}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{r4});$ $Q_1 = q_{43};$ $Q_2 = q_{24} - q_{43};$ $Q_3 = q_{65}; Q_4 = -q_{65} + q_{26};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис.34е	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43}q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_3 = A_3q_{34}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{43} + q_{24})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{15}^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6q_{26}^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	$p_{H1} - (A_{H1} + A_5 + A_{15})q_{15}^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H1});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_4(q_{24} - q_{43})^2 - A_{24}q_{24}^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H2});$ $p_{H2} - A_{H2}(q_{24} + q_{26})^2 - (A_6 + A_{26})q_{26}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{H2});$ $A_4(q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43})q_{43}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{r2});$ $Q_1 = q_{43};$ $Q_2 = q_{24} - q_{43};$ $Q_3 = q_{15};$ $Q_4 = q_{26};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис.34ж	$p_1 = p_{H1} - A_{H1}q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{H1});$ $p_2 = p_{H2} - A_{H2}q_{24}^2 - \rho g(h_2 - h_{H2});$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43}q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_5 - p_6 = A_{56}q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3q_{43}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{24} - q_{43})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6q_{56}^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	$p_{H1} - (A_{H1} + A_{15})q_{15}^2 - A_5(q_{15} - q_{56})^2 = \rho g(h_{r3} - h_{H1});$ $p_{H2} - (A_{H2} + A_{24})q_{24}^2 - A_4(q_{24} - q_{43})^2 = \rho g(h_{r2} - h_{H2});$ $A_4(q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43})q_{43}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{r2});$ $A_5(q_{15} - q_{56})^2 - (A_6 + A_{56})q_{56}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{r3});$ $Q_1 = q_{43};$ $Q_2 = q_{24} - q_{43};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

Насосы на Рисунках 30–34 могут быть как одинаковыми, так и различными, в любом случае расчет их на поддержание требуемого напора проводился с

учетом данных Таблицы 1. Предполагается также, что надежность насосов выше, чем трубопроводов, влияние разрывов которых на живучесть сети НППВ рассматривается в данной главе.

Таблица 14 – Результаты моделирования водоотдачи КС НППВ с учетом ее повреждений

Количество задействованных ПГ	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d = 150$ мм и заданном напоре $H$ , м.вод.ст.								Схема задействования ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
$N=1$	<b>28</b>	<b>39</b>	<b>48</b>	<b>55</b>	<b>62</b>	<b>68</b>	<b>73</b>	<b>78</b>	Рис.20а
$N=2$	11	16	20	23	25	28	30	58	Рис.30а
	25	36	44	51	57	62	67	56	
	<b>36</b>	<b>42</b>	<b>64</b>	<b>74</b>	<b>82</b>	<b>90</b>	<b>97</b>	<b>114</b>	
	1	1	1	1	1	2	2	2	Рис.30б
	23	32	39	45	50	55	59	63	
	<b>24</b>	<b>33</b>	<b>40</b>	<b>46</b>	<b>51</b>	<b>57</b>	<b>61</b>	<b>65</b>	
	11	16	20	23	25	28	30	32	Рис.30в
	21	29	36	42	46	51	55	59	
	<b>32</b>	<b>45</b>	<b>56</b>	<b>65</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>85</b>	<b>91</b>	
	5	7	9	11	12	13	14	15	Рис.30г
21	29	36	42	46	51	55	59		
<b>26</b>	<b>36</b>	<b>45</b>	<b>53</b>	<b>58</b>	<b>64</b>	<b>69</b>	<b>74</b>		
$N=3$	13	18	23	26	29	32	34	37	Рис.31а
	13	19	23	26	30	32	35	37	
	17	24	29	33	37	41	44	47	
	<b>43</b>	<b>61</b>	<b>75</b>	<b>85</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	Рис.31б
	9	12	15	17	19	21	23	24	
	16	22	27	31	35	38	41	44	
	17	24	29	33	37	41	44	47	Рис.31в
	<b>42</b>	<b>58</b>	<b>71</b>	<b>81</b>	<b>91</b>	<b>100</b>	<b>108</b>	<b>115</b>	
	11	16	20	23	26	28	30	32	
	14	20	25	29	32	35	38	41	Рис.31г
	17	24	30	34	38	42	45	48	
	<b>42</b>	<b>60</b>	<b>75</b>	<b>86</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	
	5	7	8	9	11	12	13	14	Рис.31г
	7	11	13	15	17	19	20	22	
	25	36	44	50	56	62	67	71	
<b>37</b>	<b>54</b>	<b>65</b>	<b>74</b>	<b>84</b>	<b>93</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	Рис.32д	
0	0	0	0	0	0	0	0		
17	24	30	35	39	42	46	49		
18	25	31	36	40	44	47	50	Рис.32е	
<b>35</b>	<b>49</b>	<b>61</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>86</b>	<b>93</b>	<b>99</b>		
4	6	8	9	10	11	12	13		
7	10	12	14	16	17	18	20	Рис.32е	
8	12	14	17	19	20	22	24		
<b>19</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>48</b>	<b>52</b>	<b>57</b>		

Продолжение Таблицы 14

	8	12	15	17	19	21	22	24	Рис.32ж	
	11	16	19	22	25	27	29	31		
	21	29	36	42	46	51	55	59		
	<b>40</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>90</b>	<b>99</b>	<b>106</b>	<b>114</b>		
	0	0	0	0	0	0	0	0		
	12	17	21	24	27	30	32	34	Рис.32з	
	25	36	44	51	56	62	67	71		
	<b>37</b>	<b>53</b>	<b>65</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>92</b>	<b>99</b>	<b>105</b>		
	9	12	15	17	20	21	23	25	Рис.32и	
	11	16	20	23	25	28	30	32		
	14	19	24	27	30	33	36	38		
	<b>34</b>	<b>47</b>	<b>59</b>	<b>67</b>	<b>75</b>	<b>82</b>	<b>89</b>	<b>95</b>		
N = 4	10	15	18	21	24	26	28	29	Рис.33а	
	10	15	19	22	24	26	28	30		
	12	16	20	23	26	28	30	32		
	12	16	20	23	26	28	30	32		
	<b>44</b>	<b>62</b>	<b>77</b>	<b>89</b>	<b>100</b>	<b>108</b>	<b>116</b>	<b>123</b>		
		3	5	6	7	8	9	9	10	Рис.33б
		5	7	9	11	12	13	14	15	
		15	22	27	31	35	38	41	44	
		16	23	28	32	36	40	43	46	
		<b>39</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>91</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>115</b>	
		Рис.33в	8	12	15	17	19	21	22	24
	11		16	20	23	26	28	31	33	
	11		16	20	23	26	28	31	33	
12	17		21	24	27	29	32	34		
<b>42</b>	<b>61</b>		<b>76</b>	<b>87</b>	<b>98</b>	<b>106</b>	<b>116</b>	<b>124</b>		
Рис.34г	0	0	0	0	0	0	0	0		
	8	12	15	17	19	21	23	25		
	15	22	27	31	35	39	41	44		
	16	23	28	32	36	40	43	46		
	<b>39</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>115</b>		
	Рис.34д	3	5	6	7	7	8	9	10	
5		7	8	10	11	12	13	14		
5		7	9	10	12	13	14	15		
6		9	11	13	14	16	17	18		
<b>19</b>		<b>28</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>49</b>	<b>53</b>	<b>57</b>		
Рис.34е	3	5	6	7	8	8	9	10		
	5	7	9	11	12	13	14	15		
	11	16	19	22	24	27	29	31		
	21	29	36	41	46	51	55	58		
	<b>40</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>90</b>	<b>99</b>	<b>107</b>	<b>114</b>		
По справочнику РТП	<b>55</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>95</b>	<b>105</b>	<b>110</b>	<b>130</b>	<b>140</b>		

В Таблице 14 приведены результаты моделирования водоотдачи кольцевой сети НППВ без повреждений и с повреждениями, а также, для сравнения,

значения водоотдачи по справочникам РТП и водоснабжения [4, 109] при  $d = 150$  мм и напоре  $H = 10 \div 80$  м вод. ст. Порядок расчетов и значения коэффициентов сопротивления  $\{A\}$  для различных вариантов расположения насосных станций, ПГ и расстояний между ними приведены в Главе 2 ч. 2.3.

Как следует из анализа результатов моделирования (Таблица 14), кольцевая сеть НППВ при различных вариантах повреждений трубопроводов, количестве и порядке задействованных ПГ обладает достаточной живучестью и в большинстве случаев обеспечивает требуемую водоотдачу.

Имеет смысл ввести понятие коэффициент живучести  $K_{ж}$  сети НППВ, который при повреждении участков трубопроводов сети НППВ выражается отношением числа задействованных ПГ, обеспечивающих водоотдачу, к общему числу задействованных ПГ. Очевидно, для схем *в* и *г* на Рисунке 30,  $K_{ж} = 1$ , так как оба задействованных ПГ обеспечивают водоотдачу.

При задействовании трех ПГ ( $N = 3$ ) и повреждении одного трубопровода (Рисунок 31, схемы б-г) все ПГ обеспечивают водоотдачу, следовательно  $K_{ж} = 1$ . При двух повреждениях из пяти возможных ситуаций (Рисунок 32 схемы д-и) в двух случаях один ПГ оказывается неработоспособным (Рисунок 32, схемы д и з), тогда  $K_{ж} = (3 \cdot 3 + 2 \cdot 2) / (5 \cdot 3) = 0,867$ .

При задействовании четырех ПГ ( $N = 4$ ) и повреждении одного трубопровода (Рисунок 33, схемы б и в) все ПГ обеспечивают водоотдачу, следовательно  $K_{ж} = 1$ . А при двух повреждениях из четырех возможных ситуаций (Рисунок 34, схемы г-ж) один ПГ оказывается неработоспособным (Рисунок 34, схема г), тогда  $K_{ж} = (3 \cdot 4 + 1 \cdot 3) / (4 \cdot 4) = 0,938$  [182].

Таким образом, методом расчетного моделирования с использованием разработанной расчетной модели кольцевой сети НППВ возможно оценивать живучесть ВС при помощи коэффициента живучести и водоотдачу как каждого отдельно взятого ПГ, так и всей рассматриваемой ВС в целом с учетом самых разнообразных параметров (диаметра магистрального трубопровода сети НППВ, количеством задействуемых ПГ, расстояний между ними и НС, коэффициентов

линейных и местных сопротивлений, НРХ насосов, применяемых в НС) при различных вариантах возможных повреждений в условиях ЧС природного и техногенного характера.

### **3.2 Расчётная оценка живучести сетей наружного противопожарного водоснабжения**

При помощи компьютерного пакета MathCad [177], позволяющего решать нелинейные системы алгебраических уравнений, описывающих расчетные модели систем НППВ, (Глава 3, Таблицы 11–13), возможно проводить оценку водоотдачи сетей НППВ при различных вариантах повреждений их участков и оценивать тем самым живучесть сетей, т.е. их способность обеспечивать водоотдачу в условиях повреждений при различных ЧС природного и техногенного характера. В Таблице 14 приведены результаты моделирования водоотдачи КС НППВ при различных вариантах её повреждений и числе задействованных ПГ.

Примечание: в столбцах – водоотдача из каждого отдельно взятого ПГ в зависимости от их количества ( $N=1,2,3,4$ ), в строках выделенным жирным шрифтом – водоотдача из всей ВС.

На практике часто используют термин «живучесть» (Таблица 15), который применим и к сетям НППВ. В этой связи представляется целесообразным уточнить количественные оценки живучести сети НППВ с учётом вероятностей  $\{p_i\}$  различных повреждающих ситуаций. Тогда коэффициент живучести ПГ, использующий относительное число работоспособных ПГ, будет иметь вид:

$$K_{\Gamma} = \sum_{i=1}^M p_i K_{\Gamma i} = \sum_{i=1}^M p_i \frac{N_i}{N_{oi}}, \quad (24)$$

где  $K_{\Gamma i}$  – коэффициент живучести ПГ при  $i$ -й повреждающей ситуации;  $N_i$ ,  $N_{oi}$  – число исправных ПГ и общее число ПГ, которые необходимо было бы задействовать на тушение пожара при  $i$ -й повреждающей ситуации;  $M$  – общее число повреждающих ситуаций.

Таблица 15 – Формулировки термина «Живучесть»

№ п/п	Формулировка	Авторы, источник
1	Живучесть корабля – способность корабля вести бой при повреждении противником некоторых его частей	Адмирал Макаров С.О.
2	Живучесть в технике – свойство объекта (устройства, системы, изделия военной техники и др.) противостоять потере работоспособности вследствие дефектов и повреждений, возникающих в процессе эксплуатации в силу внутренних и внешних причин	[203]
3	Живучесть – свойство системы продолжить нормальное функционирование с допустимыми показателями эффективности при непрогнозируемых или преднамеренных воздействиях	[204]
4	Комментарий к термину «надёжность» (п.1.1): Термин "живучесть" соответствует международному термину fail-safeconcept	[205]
5	Живучесть судна - способность противостоять воздействию сил ветра и волн, пожарам и пр., при повреждениях сохранять и восстанавливать (полностью или частично) эксплуатационные и мореходные качества	[206]
6	Живучесть - свойство объекта - состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта; - сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации; - сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов	[207]
7	Живучесть сети электросвязи – свойство сети электросвязи сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях, создаваемых воздействиями внешних дестабилизирующих факторов	[208]
8	Живучесть системы теплоснабжения - способность системы сохранять свою работоспособность в аварийных (экстремальных) условиях, а также после длительных (более 54 ч) остановов;	СП 124.13330. 2012
9	Живучесть сети НППВ – способность сети НППВ обеспечивать водоотдачу (полностью или частично) при повреждении некоторых её компонентов (трубопроводов, гидрантов и др.) вследствие внутренних (коррозия, броски давления и др.) или внешних (взрывы технологических установок, землетрясения и др.) причин	соискатель

При этом следует иметь ввиду условие:

$$\sum_{i=1}^M p_i = 1. \quad (25)$$

В Таблицах 16-18, соответствующие схемам на Рисунках 30-34 приведены величины коэффициентов  $\{K_{Гi}\}$ . В Таблицах 16-18 также приведены расчётные значения водоотдачи  $\{Q\}$  неповреждённых и повреждённых сетей НППВ в соответствии с расчётными примерами. Это позволило предложить и другой коэффициент живучести сети НППВ, учитывающий водоотдачу:

$$K_Q = \sum_{i=1}^M p_i K_{iQ}, \quad (26)$$

где  $K_{iQ}$  – средний по диапазону напоров  $\{H\}$  сети коэффициент живучести при  $i$ -й повреждающей ситуации (согласно таблице водоотдачи справочников руководителя тушения пожара, например в [4], принят дискретный диапазон напоров  $H=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$  м.водн.столба).

Таблица 16 – Результаты моделирования водоотдачи  $Q$  (л/с) кольцевой сети НППВ с учётом её повреждений при двух  $N=2$  задействующихся ПГ, диаметре трубы  $d=150$  мм и напоре  $H$  (м водн.столба)

Схемы	$H$	10	20	30	40	50	60	70	80	$K_{Гi}$	$K_{iQ}$
Рис.30а	$Q_{1H}$	<b>36</b>	<b>52</b>	<b>64</b>	<b>74</b>	<b>82</b>	<b>90</b>	<b>97</b>	<b>114</b>	1	1
Рис.30б	$Q_{2H}$	<b>24</b>	<b>33</b>	<b>40</b>	<b>46</b>	<b>51</b>	<b>57</b>	<b>61</b>	<b>65</b>	1	0,619
	$K_{2H}$	0,667	0,635	0,625	0,622	0,622	0,633	0,629	0,570		
Рис.30в	$Q_{3H}$	<b>32</b>	<b>45</b>	<b>56</b>	<b>65</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>85</b>	<b>91</b>	1	0,860
	$K_{3H}$	0,889	0,865	0,875	0,878	0,866	0,878	0,876	0,798		
Рис.30г	$Q_{4H}$	<b>26</b>	<b>36</b>	<b>45</b>	<b>53</b>	<b>58</b>	<b>64</b>	<b>69</b>	<b>74</b>	1	0,698
	$K_{4H}$	0,722	0,692	0,703	0,716	0,707	0,711	0,711	0,649		

Таблица 17 – Результаты моделирования водоотдачи  $Q$  (л/с) кольцевой сети НППВ с учётом её повреждений при трёх  $N=3$  задействующихся ПГ, диаметре трубы  $d=150$  мм и напоре  $H$  (м водн.столба)

Схемы	$H$	10	20	30	40	50	60	70	80	$K_{Гi}$	$K_{iQ}$
Рис.31а	$Q_{1H}$	<b>43</b>	<b>61</b>	<b>75</b>	<b>85</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	1	1
Рис.31б	$Q_{2H}$	<b>42</b>	<b>58</b>	<b>71</b>	<b>81</b>	<b>91</b>	<b>100</b>	<b>108</b>	<b>115</b>	1	0,953
	$K_{2H}$	0,977	0,951	0,947	0,953	0,948	0,952	0,956	0,950		
Рис.31в	$Q_{3H}$	<b>42</b>	<b>60</b>	<b>75</b>	<b>86</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	1	0,999
	$K_{3H}$	0,978	0,984	1,0	1,012	1,0	1,0	1,0	1,0		
Рис.31г	$Q_{4H}$	<b>37</b>	<b>54</b>	<b>65</b>	<b>74</b>	<b>84</b>	<b>93</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	1	0,878
	$K_{4H}$	0,860	0,885	0,867	0,871	0,875	0,886	0,885	0,884		
Рис.32д	$Q_{5H}$	<b>35</b>	<b>49</b>	<b>61</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>86</b>	<b>93</b>	<b>99</b>	0,667	0,820

	$K_{5H}$	0,814	0,803	0,813	0,835	0,823	0,819	0,823	0,818		
Рис.32е	$Q_{6H}$	<b>19</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>48</b>	<b>52</b>	<b>57</b>	1	0,462
	$K_{6H}$	0,442	0,459	0,453	0,471	0,469	0,457	0,460	0,471		
Рис.32ж	$Q_{7H}$	<b>40</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>90</b>	<b>99</b>	<b>106</b>	<b>114</b>	1	0,940
	$K_{7H}$	0,930	0,934	0,933	0,953	0,938	0,943	0,938	0,942		
Рис.32з	$Q_{8H}$	<b>37</b>	<b>53</b>	<b>65</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>92</b>	<b>99</b>	<b>105</b>	0,667	0,871
	$K_{8H}$	0,860	0,869	0,867	0,882	0,865	0,876	0,876	0,868		
Рис.32и	$Q_{9H}$	<b>34</b>	<b>47</b>	<b>59</b>	<b>67</b>	<b>75</b>	<b>82</b>	<b>89</b>	<b>95</b>	1	0,784
	$K_{9H}$	0,791	0,770	0,787	0,788	0,781	0,781	0,788	0,785		

Таблица 18 – Результаты моделирования водоотдачи  $Q$  (л/с) кольцевой сети НППВ с учётом её повреждений при четырёх  $N=4$  задействовывающихся ПГ, диаметре трубы  $d=150$  мм и напоре  $H$  (м водн.столба)

Схемы	$H$	10	20	30	40	50	60	70	80	$K_{IT}$	$K_{iQ}$
Рис.33а	$Q_{1H}$	<b>44</b>	<b>62</b>	<b>77</b>	<b>89</b>	<b>100</b>	<b>108</b>	<b>116</b>	<b>123</b>	1	1
Рис.33б	$Q_{2H}$	<b>39</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>91</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>115</b>	1	0,918
	$K_{2H}$	0,886	0,919	0,909	0,910	0,910	0,926	0,922	0,935		
Рис.33в	$Q_{3H}$	<b>42</b>	<b>61</b>	<b>76</b>	<b>87</b>	<b>98</b>	<b>106</b>	<b>116</b>	<b>124</b>	1	0,987
	$K_{3H}$	0,955	0,984	0,987	0,978	0,980	0,981	1,00	1,008		
Рис.34г	$Q_{4H}$	<b>39</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>115</b>	0,75	0,915
	$K_{4H}$	0,886	0,919	0,909	0,899	0,900	0,926	0,922	0,935		
Рис.34д	$Q_{5H}$	<b>19</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>49</b>	<b>53</b>	<b>57</b>	1	0,451
	$K_{5H}$	0,432	0,452	0,442	0,449	0,440	0,454	0,457	0,463		
Рис.34е	$Q_{6H}$	<b>40</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>90</b>	<b>99</b>	<b>107</b>	<b>114</b>	1	0,915
	$K_{6H}$	0,909	0,919	0,909	0,909	0,900	0,917	0,922	0,927		

Величина  $K_{iQ}$ , в свою очередь, определяется как среднее соотношение водоотдачи повреждённой сети НППВ при  $i$ -й повреждающей ситуации к водоотдаче неповреждённой сети:

$$K_{iQ} = \frac{1}{8} (K_{i,H=10} + K_{i,H=20} + \dots + K_{i,H=80}), \quad i=2, \dots, M, \quad (27)$$

где  $K_{i,H} = Q_{i,H} / Q_{1,H}$  – соотношение водоотдачи сети НППВ при  $i$ -й повреждающей ситуации к водоотдаче неповреждённой сети при напоре  $H$  – Рисунки 30-34 (индекс «1» соответствует неповреждённой сети).

Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать вывод, что сети НППВ обладают достаточно высокой живучестью при повреждении их отдельных участков, что позволяет им обеспечивать водоотдачу на тушение

крупных пожаров объектов НХП и НПП в самых сложных условиях, учитывая факторы ЧС природного и техногенного характера (землетрясения, взрывы ТО и ТУ, резервуаров хранения ЛВЖ и ГЖ и т.д.).

### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3**

Полученные расчётные модели пригодны как для оценки водоотдачи в нормальном режиме функционирования, так и в аварийном, с учётом повреждений трубопроводов при авариях на предприятиях НХП и НПП, землетрясений и других ЧС техногенного и природного характера, для чего впервые введено понятие живучести сетей НППВ и показана возможность её количественной оценки при помощи коэффициента живучести.

Компьютерное моделирование позволяет, как решать задачи анализа и синтеза сетей НППВ, так и давать оценку их живучести при повреждениях в результате аварий на предприятиях НХП и НПП, землетрясений и других ЧС природного и техногенного характера.

Также проведено расчетное моделирование живучести сетей НППВ при повреждении и блокировании одного или нескольких участков трубопроводов в результате аварий на технологических установках и оборудовании предприятий НХП и НПП, землетрясений или других ЧС природного и техногенного характера. На основе результатов расчетного моделирования показана возможность объективной оценки живучести сетей НППВ и выведен соответствующий количественный показатель.

Проведённый комплекс исследований позволяет также разработать рекомендации по совершенствованию нормативных документов в части уточнённой оценки водоотдачи сетей НППВ, что и будет рассмотрено в следующей главе.

**ГЛАВА 4. КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЦЕНКЕ  
ВОДООТДАЧИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ  
НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ЧАСТИ УТОЧНЁННОЙ ОЦЕНКИ  
ВОДООТДАЧИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

**4.1 Компьютерный эксперимент по оценке водоотдачи тупиковых и  
кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения**

В рамках диссертационного исследования был проведен комплекс расчётных оценок водоотдачи посредством решения нелинейных алгебраических уравнений (Таблицы 4, 11–13). Для этого был использован компьютерный пакет MathCad [177] – пример окна для расчета в программе приведен на Рисунках 35, 36 и в Приложении Б.

$q_{01} := 0.01$	$d := 0.15$	$\lambda := 0.11 \cdot \left[ \left( \frac{1}{d} \right) \div 1000 \right]^{0.25}$
$q_{02} := 0.01$	$\rho_1 := 1000$	
$q_{23} := 0.01$	$L_{01} := 105$	$\xi_{л01} := \frac{\lambda \cdot L_{01}}{d}$
$q_{41} := 0.01$	$L_{02} := 105$	$\xi_{л02} := \frac{\lambda \cdot L_{02}}{d}$
$q_{54} := 0.01$	$L_{23} := 201$	$\xi_{л23} := \frac{\lambda \cdot L_{23}}{d}$
$q_{53} := 0.01$	$L_{41} := 96$	$\xi_{л41} := \frac{\lambda \cdot L_{41}}{d}$
$A_{н1} := 1.44 \cdot 10^8$	$L_{54} := 1619$	$\xi_{л54} := \frac{\lambda \cdot L_{54}}{d}$
$A_{н2} := 1.44 \cdot 10^8$	$L_{53} := 925$	$\xi_{л53} := \frac{\lambda \cdot L_{53}}{d}$
$R_{н1} := 1 \cdot 10^5$	$\xi_m := 1.2$	
$R_{н2} := 1 \cdot 10^5$	$K_{э} := 1$	
$A_{лг} := 5.1 \cdot 10^7$		
$F_1 := \pi d^2 \div 4$		

Рисунок 35 – Окно ввода данных для расчёта водоотдачи КС НППВ для  
схемы изображенной на Рисунке 20.г (задействованы 4 ПГ) математическим  
пакетом MathCad

Given

$$P_{н1} - A_{н1} \cdot (q_{01} + q_{02})^2 - A_{пг} \cdot (q_{01} + q_{41})^2 - A_{01} \cdot q_{01}^2 = 0$$

$$A_{пг} \cdot (q_{54} - q_{41})^2 - A_{пг} \cdot (q_{01} + q_{41})^2 - A_{41} \cdot q_{41}^2 = 0$$

$$P_{н2} - A_{н2} \cdot (q_{54} + q_{53})^2 - A_{пг} \cdot (q_{54} - q_{41})^2 - A_{54} \cdot q_{54}^2 = 0$$

$$P_{н2} - A_{н2} \cdot (q_{54} + q_{53})^2 - A_{пг} \cdot (q_{23} + q_{53})^2 - A_{53} \cdot q_{53}^2 = 0$$

$$A_{пг} \cdot (q_{02} - q_{23})^2 - A_{пг} \cdot (q_{23} + q_{53})^2 - A_{23} \cdot q_{23}^2 = 0 \quad +$$

$$P_{н1} - A_{н1} \cdot (q_{01} + q_{02})^2 - A_{пг} \cdot (q_{02} - q_{23})^2 - A_{02} \cdot q_{02}^2 = 0$$


---

Find(q01, q02, q23, q41, q54, q53, q01 + q41, q02 - q23, q23 + q53, q54 - q41) =

	0
0	0.0128950
1	0.0118388
2	0.0003772
3	-0.0022961
4	0.0084680
5	0.0110759
6	0.0105989
7	0.0114616
8	0.0114531
9	0.0107641

Рисунок 36 – Окно вывода данных для расчёта водоотдачи КС НППВ для схемы изображенной на Рисунке 20.г (задействованы 4 ПГ) математическим пакетом MathCad

Здесь: Given – команда для ввода системы нелинейных уравнений (Таблица 4 для схемы на Рисунке 19г); Find – команда для расчета неизвестных системы нелинейных уравнений (в данном случае расходов на участках трубопровода и результирующих расходов из каждого отдельного ПГ), Таблица со строками от 0 до 9 – окно вывода результатов.

При вводе данных в расчетной программе учитываются начальные значения водоотдачи участков трубопроводов между гидрантами:  $q_{01}$ ,  $q_{02}$ ,  $q_{23}$ ,  $q_{41}$ ,  $q_{54}$  и  $q_{53}$  (обозначения на Рисунке 19г); сопротивления насосов  $A_{н1}$  и  $A_{н2}$  (данные технических характеристик); подача насосов  $P_{н1}$  и  $P_{н2}$ ; сопротивление ПГ  $A_{пг}$ ;

диаметр трубопровода  $d$ ; расстояния между ПГ  $L$  и коэффициенты для расчета местных и линейных сопротивлений [60–67].

Результаты компьютерных расчётов по оценке водоотдачи из гидрантов и КС НППВ в целом приведены для диаметров магистральных трубопроводов от 100 до 350 в Таблицах 19–24, для ТС – в Таблице 25. В частности, из результатов компьютерного эксперимента следует, что общая водоотдача КС НППВ оказывалась меньше, чем следовало из Таблицы 1 справочника РТП [4], что показано в Таблицах 19–24

Таблица 19 – Результаты расчетов водоотдачи (л/с) гидрантов и КС в целом

Количество задействованных ПГ $N$	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d=100$ мм и заданном напоре м.водн.столба								Схемы задействованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
1 ПГ	<b>18</b>	<b>25</b>	<b>31</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>50</b>	Рис.20а
2 ПГ	5	7	9	10	12	13	14	15	Рис.20б
	<b>18</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>39</b>	<b>43</b>	<b>46</b>	<b>50</b>	
3 ПГ	<b>23</b>	<b>32</b>	<b>39</b>	<b>45</b>	<b>51</b>	<b>56</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	Рис.20в
	7	10	13	15	16	18	19	21	
	9	13	16	18	20	22	24	26	
4 ПГ	14	20	24	28	31	34	37	39	Рис.20г
	<b>30</b>	<b>43</b>	<b>53</b>	<b>61</b>	<b>67</b>	<b>74</b>	<b>80</b>	<b>86</b>	
	3	5	7	9	10	12	13	15	
	5	7	9	11	13	15	17	18	
	12	15	18	20	22	23	24	25	
5 ПГ	13	16	19	21	22	24	26	28	Рис.20д
	4	5	6	7	8	8	9	11	
	5	5	7	8	9	9	10	10	
	7	10	12	14	16	18	19	20	
	8	11	13	15	17	19	20	21	
	9	12	15	18	20	21	23	25	
По справочнику РТП [4]	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>58</b>	<b>64</b>	

Примечание: в столбцах – водоотдача из каждого отдельно взятого ПГ в зависимости от их количества ( $N=1,2,3,4,5$ ), в строках выделенным жирным шрифтом – водоотдача из всей ВС.

Таблица 20 – Результаты расчетов водоотдачи (л/с) гидрантов и КС в целом

Количество задействованных ПГ <i>N</i>	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d=150$ мм и заданном напоре м.водн.столба								Схемы задействованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
1 ПГ	<b>28</b>	<b>39</b>	<b>48</b>	<b>55</b>	<b>62</b>	<b>68</b>	<b>73</b>	<b>78</b>	Рис.20а
2 ПГ	11	16	20	23	25	28	30	32	Рис.20б
	25	36	44	51	57	62	67	72	
3 ПГ	<b>36</b>	<b>42</b>	<b>64</b>	<b>74</b>	<b>82</b>	<b>90</b>	<b>97</b>	<b>104</b>	Рис.20в
	13	18	23	26	29	32	34	37	
	13	19	23	26	30	32	35	37	
	17	24	29	33	37	41	44	47	
4 ПГ	<b>43</b>	<b>61</b>	<b>75</b>	<b>85</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	Рис.20г
	10	15	18	21	24	26	28	29	
	10	15	19	22	24	26	28	30	
	12	16	20	23	26	28	30	32	
	12	16	20	23	26	28	30	32	
5 ПГ	<b>44</b>	<b>62</b>	<b>77</b>	<b>89</b>	<b>100</b>	<b>108</b>	<b>116</b>	<b>123</b>	Рис.20д
	7	10	12	14	17	17	19	20	
	7	10	13	15	17	18	19	20	
	8	12	14	17	20	20	22	23	
	11	15	19	21	26	27	29	31	
	11	15	19	21	26	27	29	31	
По справочнику РТП [4]	<b>55</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>95</b>	<b>105</b>	<b>110</b>	<b>130</b>	<b>140</b>	

Таблица 21 – Результаты расчетов водоотдачи (л/с) гидрантов и КС в целом

Количество задействованных ПГ $N$	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d=200$ мм и заданном напоре м.водн.столба								Схемы задействованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
1 ПГ	<b>31</b>	<b>45</b>	<b>55</b>	<b>63</b>	<b>70</b>	<b>77</b>	<b>83</b>	<b>89</b>	Рис.20а
2 ПГ	16	23	28	33	37	40	43	46	Рис.20б
	26	36	44	51	57	63	68	72	
	<b>42</b>	<b>59</b>	<b>72</b>	<b>84</b>	<b>94</b>	<b>103</b>	<b>111</b>	<b>118</b>	
3 ПГ	15	22	27	31	34	38	41	43	Рис.20в
	15	22	27	31	34	38	41	43	
	17	23	29	33	37	41	44	47	
	<b>47</b>	<b>67</b>	<b>83</b>	<b>95</b>	<b>105</b>	<b>117</b>	<b>126</b>	<b>133</b>	
4 ПГ	12	17	21	24	27	29	32	34	Рис.20г
	12	17	21	24	27	29	32	34	
	12	17	21	24	27	30	32	35	
	12	17	21	24	27	30	32	35	
	<b>48</b>	<b>68</b>	<b>84</b>	<b>96</b>	<b>108</b>	<b>118</b>	<b>128</b>	<b>138</b>	
5 ПГ	9	13	16	18	20	22	24	25	Рис.20д
	9	13	16	18	20	22	24	25	
	9	13	16	19	21	23	25	26	
	11	15	19	22	24	27	29	31	
	11	15	19	22	24	27	29	31	
	<b>49</b>	<b>69</b>	<b>86</b>	<b>99</b>	<b>109</b>	<b>121</b>	<b>131</b>	<b>138</b>	
По справочнику РТП [4]	<b>65</b>	<b>90</b>	<b>110</b>	<b>130</b>	<b>145</b>	<b>163</b>	<b>182</b>	<b>205</b>	

Таблица 22 – Результаты расчетов водоотдачи (л/с) гидрантов и КС в целом

Количество задействованных ПГ <i>N</i>	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d=250$ мм и заданном напоре м.водн.столба								Схемы задействованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
1 ПГ	<b>33</b>	<b>47</b>	<b>57</b>	<b>66</b>	<b>74</b>	<b>81</b>	<b>87</b>	<b>93</b>	Рис.20а
2 ПГ	20	28	34	39	44	48	52	56	Рис.20б
	24	34	42	48	54	59	64	68	
	<b>44</b>	<b>62</b>	<b>76</b>	<b>87</b>	<b>99</b>	<b>107</b>	<b>116</b>	<b>124</b>	
3 ПГ	16	23	28	32	36	39	42	45	Рис.20в
	16	23	28	32	36	39	42	45	
	16	23	28	33	37	40	43	46	
	<b>48</b>	<b>69</b>	<b>84</b>	<b>97</b>	<b>109</b>	<b>118</b>	<b>127</b>	<b>136</b>	
4 ПГ	12	17	21	25	28	30	33	35	Рис.20г
	12	17	21	25	28	30	33	35	
	13	18	22	25	28	31	33	35	
	13	18	22	25	28	31	33	36	
	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>86</b>	<b>100</b>	<b>112</b>	<b>122</b>	<b>132</b>	<b>141</b>	
5 ПГ	10	14	17	20	22	24	26	28	Рис.20д
	10	14	17	20	22	24	26	28	
	10	14	17	20	22	24	26	28	
	11	15	18	21	24	26	28	30	
	11	15	18	21	24	26	28	30	
	<b>52</b>	<b>72</b>	<b>87</b>	<b>102</b>	<b>114</b>	<b>124</b>	<b>134</b>	<b>144</b>	
По справочнику РТП [4]	<b>85</b>	<b>115</b>	<b>145</b>	<b>185</b>	<b>200</b>	<b>225</b>	<b>255</b>	<b>287</b>	

Таблица 23 – Результаты расчетов водоотдачи (л/с) гидрантов и КС в целом

Количество задействованных ПГ <i>N</i>	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d=300$ мм и заданном напоре м.водн.столба								Схемы задействованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
1 ПГ	<b>34</b>	<b>47</b>	<b>58</b>	<b>67</b>	<b>75</b>	<b>82</b>	<b>89</b>	<b>95</b>	Рис.20а
2 ПГ	21	30	37	43	48	57	56	60	Рис.20б
	23	33	40	47	52	52	62	66	
	<b>44</b>	<b>63</b>	<b>77</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>109</b>	<b>118</b>	<b>126</b>	
3 ПГ	16	23	28	32	36	40	43	46	Рис.20в
	16	23	28	32	36	40	43	46	
	16	23	28	33	37	40	43	46	
	<b>48</b>	<b>69</b>	<b>84</b>	<b>97</b>	<b>109</b>	<b>120</b>	<b>129</b>	<b>138</b>	
4 ПГ	13	18	22	25	28	31	33	35	Рис.20г
	13	18	22	25	28	31	33	35	
	13	18	22	25	28	31	33	36	
	13	18	22	25	28	31	33	36	
	<b>52</b>	<b>72</b>	<b>88</b>	<b>100</b>	<b>112</b>	<b>124</b>	<b>132</b>	<b>142</b>	
5 ПГ	10	14	17	20	22	25	27	28	Рис.20д
	10	14	17	20	22	25	27	28	
	10	14	18	20	23	25	27	29	
	10	15	18	21	23	25	27	29	
	10	15	18	21	23	26	28	29	
	<b>50</b>	<b>72</b>	<b>88</b>	<b>102</b>	<b>113</b>	<b>125</b>	<b>136</b>	<b>143</b>	
По справочнику РТП [4]	<b>115</b>	<b>170</b>	<b>205</b>	<b>235</b>	<b>265</b>	<b>290</b>	<b>330</b>	<b>370</b>	

Таблица 24 – Результаты расчетов водоотдачи (л/с) гидрантов и КС в целом

Количество задействованных ПГ <i>N</i>	Водоотдача сети $Q_K$ , л/с, при диаметре трубы $d=350$ мм и заданном напоре м.водн.столба								Схемы задействованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
1 ПГ	<b>34</b>	<b>48</b>	<b>58</b>	<b>67</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>89</b>	<b>95</b>	Рис.20а
2 ПГ	22	31	38	44	49	54	58	62	Рис.20б
	23	33	40	46	51	56	61	65	
	<b>45</b>	<b>64</b>	<b>78</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	<b>119</b>	<b>127</b>	
3 ПГ	16	23	28	33	36	40	43	46	Рис.20в
	16	23	28	33	36	40	43	46	
	16	23	28	33	37	40	43	46	
	<b>48</b>	<b>69</b>	<b>84</b>	<b>99</b>	<b>109</b>	<b>120</b>	<b>129</b>	<b>138</b>	
4 ПГ	13	18	22	25	28	31	33	36	Рис.20г
	13	18	22	25	28	31	33	36	
	13	18	22	25	28	31	33	36	
	13	18	22	25	28	31	33	36	
	<b>52</b>	<b>72</b>	<b>88</b>	<b>100</b>	<b>112</b>	<b>124</b>	<b>132</b>	<b>144</b>	
5 ПГ	10	14	17	20	23	25	27	29	Рис.20д
	10	14	18	20	23	25	27	29	
	10	14	18	20	23	25	27	29	
	10	15	18	21	23	25	27	29	
	10	15	18	21	23	26	27	29	
	<b>50</b>	<b>72</b>	<b>90</b>	<b>102</b>	<b>115</b>	<b>125</b>	<b>135</b>	<b>145</b>	
По справочнику РТП [4]	<b>130</b>	<b>195</b>	<b>235</b>	<b>280</b>	<b>325</b>	<b>380</b>	<b>440</b>	<b>500</b>	

Таблица 25 – Результаты расчетов расходов из гидрантов и водоотдачи ТС при различных схемах включения насосов (л/с)

Варианты	Схемы включения насосов на НС			
	Н <sub>1</sub>	Н <sub>2</sub>	Н <sub>3</sub>	Н <sub>4</sub>
1	$Q_{\Gamma} = Q_c = 28,62$	$Q_{\Gamma} = Q_c = 37,15$	$Q_{\Gamma} = Q_c = 30,87$	$Q_{\Gamma}=Q_c=34,31$
2	$Q_B = Q_c = 33,63$	$Q_B = Q_c = 42,40$	$Q_B = Q_c = 37,46$	$Q_B=Q_c=39,68$
3	$Q_B = Q_c = 36,86$	$Q_B = Q_c = 45,54$	$Q_B = Q_c = 42,09$	$Q_B=Q_c=42,99$
4	$Q_A = Q_c = 40,88$	$Q_A = Q_c = 49,18$	$Q_A = Q_c = 48,40$	$Q_A=Q_c=46,96$
5	$Q_B = 25,25;$ $Q_c = 39,13$ $Q_{\Gamma} = 13,88;$	$Q_B = 30,73;$ $Q_c = 47,62$ $Q_{\Gamma} = 16,89;$	$Q_B = 29,40;$ $Q_c = 45,56$ $Q_{\Gamma} = 16,16;$	$Q_B = 29,20;$ $Q_c = 45,25$ $Q_{\Gamma} = 16,05;$
6	$Q_B = 29,87;$ $Q_c = 44,24$ $Q_{\Gamma} = 14,36;$	$Q_B = 35,12;$ $Q_c = 52,00$ $Q_{\Gamma} = 16,88;$	$Q_B = 36,65;$ $Q_c = 54,26$ $Q_{\Gamma} = 17,62;$	$Q_B = 39,37;$ $Q_c = 56,52$ $Q_{\Gamma} = 17,15;$
7	$Q_A = 35,85;$ $Q_c = 51,46$ $Q_{\Gamma} = 15,62;$	$Q_A = 40,01;$ $Q_c = 57,44$ $Q_{\Gamma} = 17,43;$	$Q_A = 48,52;$ $Q_c = 69,65$ $Q_{\Gamma} = 21,13;$	$Q_A = 39,37;$ $Q_c = 56,52$ $Q_{\Gamma} = 17,15;$
8	$Q_B = 26,38;$ $Q_c = 44,96$ $Q_B = 18,58;$	$Q_B = 30,85;$ $Q_c = 52,58$ $Q_B = 21,73;$	$Q_B = 32,63;$ $Q_c = 55,61$ $Q_B = 22,98;$	$Q_B = 29,80;$ $Q_c = 50,79$ $Q_B = 20,99;$
9	$Q_A = 33,10;$ $Q_c = 52,33$ $Q_B = 19,24;$	$Q_A = 36,71;$ $Q_c = 58,04$ $Q_B = 21,33;$	$Q_A = 45,44;$ $Q_c = 71,85$ $Q_B = 26,41;$	$Q_A = 36,21;$ $Q_c = 57,25$ $Q_B = 21,04;$
10	$Q_A = 30,86;$ $Q_c = 52,98$ $Q_B = 22,12;$	$Q_A = 34,06;$ $Q_c = 58,48$ $Q_B = 24,42;$	$Q_A = 42,84;$ $Q_c = 73,55$ $Q_B = 30,71;$	$Q_A = 33,66;$ $Q_c = 57,79$ $Q_B = 24,13;$
11	$Q_B = 24,67;$ $Q_c = 45,28$ $Q_B = 13,30;$ $Q_{\Gamma} = 7,31;$	$Q_B = 28,78;$ $Q_c = 52,83$ $Q_B = 15,52;$ $Q_{\Gamma} = 8,53;$	$Q_B = 30,63;$ $Q_c = 56,22$ $Q_B = 16,51;$ $Q_{\Gamma} = 9,08;$	$Q_B = 27,83;$ $Q_c = 51,09$ $Q_B = 15,01;$ $Q_{\Gamma} = 8,25;$
12	$Q_A = 28,99;$ $Q_c = 53,48$ $Q_B = 16,54;$ $Q_{\Gamma} = 7,95;$	$Q_A = 31,88;$ $Q_c = 58,81$ $Q_B = 18,19;$ $Q_{\Gamma} = 8,74;$	$Q_A = 40,60;$ $Q_c = 74,90$ $Q_B = 23,16;$ $Q_{\Gamma} = 11,14;$	$Q_A = 31,55;$ $Q_c = 58,20$ $Q_B = 18,00;$ $Q_{\Gamma} = 8,65;$
13	$Q_A = 31,95;$ $Q_c = 52,67$ $Q_B = 13,37;$ $Q_{\Gamma} = 7,35;$	$Q_A = 35,34;$ $Q_c = 58,26$ $Q_B = 14,79;$ $Q_{\Gamma} = 8,13;$	$Q_A = 44,12;$ $Q_c = 72,73$ $Q_B = 18,46;$ $Q_{\Gamma} = 10,15;$	$Q_A = 34,90;$ $Q_c = 57,53$ $Q_B = 14,60;$ $Q_{\Gamma} = 8,03;$
14	$Q_A = 28,50;$ $Q_c = 53,61$ $Q_B = 14,73;$ $Q_B = 10,38;$	$Q_A = 31,32;$ $Q_c = 58,89$ $Q_B = 16,18;$ $Q_B = 11,40;$	$Q_A = 40,01;$ $Q_c = 75,24$ $Q_B = 20,67;$ $Q_B = 14,56;$	$Q_A = 31,00;$ $Q_c = 58,30$ $Q_B = 16,02;$ $Q_B = 11,28;$

15	$Q_A = 28,28;$	$Q_A = 31,06;$	$Q_A = 39,74;$	$Q_A = 30,75;$
	$Q_C = 53,66$	$Q_C = 58,93$	$Q_C = 75,41$	$Q_C = 58,35$
	$Q_B = 13,83;$	$Q_B = 15,18;$	$Q_B = 19,43;$	$Q_B = 15,03;$
	$Q_B = 7,45;$	$Q_B = 8,19;$	$Q_B = 10,48;$	$Q_B = 8,11;$
	$Q_\Gamma = 4,10;$	$Q_\Gamma = 4,50;$	$Q_\Gamma = 5,76;$	$Q_\Gamma = 4,46;$

Примечание.  $H_1$  — один насос типа CR 150-1;  $H_2$  — два последовательно включенных насоса CR 150-1;  $H_3$  — два параллельно включенных насоса CR 150-1;  $H_4$  — один насос CR 150-2-1.

#### **4.2 Рекомендации по совершенствованию нормативных документов в части уточнённой оценки водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения**

Поскольку тушение пожаров различных классов [44] невозможно без использования основного огнетушащего вещества – воды, которая в большинстве случаев забирается из сетей НППВ [51, 57, 101, 103–105], требования к необходимым уровням её расхода на тушение пожаров изложены в специальном своде правил – СП 8.13130.2009 [198]. Однако в данном документе не приведены сведения об оценке достаточности водоотдачи сетей НППВ, обеспечивающих тушение пожаров.

Для обеспечения должного уровня пожарной безопасности в гарнизонах пожарной охраны имеются перечни наиболее важных объектов, в т.ч. предприятия НХП и НПП, на которые необходимо разрабатывать документы оперативного планирования согласно документа [3]. Одним из важнейших разделов таких ПТП является оценка достаточности водоснабжения, которая для сетей НППВ осуществляется с использованием таблиц из справочников руководителей тушения пожара или водоснабжения, например, [4, 109] – смотрите Таблицу 1.

Однако, как показано в первых трех главах работы, в ходе тушения крупных пожаров в т.ч. на объектах НХП и НПП, возникают ситуации, когда фактическая водоотдача сети НППВ недостаточна, хотя, согласно Таблице 1 и расчетам, приведенным в ПТП, составленном на объект, данная сеть должна обеспечивать

требуемый расход воды. Это резко осложняет тушение пожара и приводит к необходимости изыскивать альтернативные водоисточники, вызывать дополнительные силы и средства и т.п. В работах [168–180] показано, что такая ситуация возможна из-за игнорирования ряда факторов, влияющих на водоотдачу сети НППВ – количества и взаимного расположения задействуемых пожарных гидрантов, рельефа местности, возможностей насосных станций и др.

Таким образом, возникает насущная необходимость внесения изменений в документы, используемые при предварительном планировании действий по тушению пожаров, в т.ч. на предприятиях НХП и НПП, в части уточнённой оценки водоотдачи сетей НППВ. Для этого может быть разработан как самостоятельный документ, например, «Методические рекомендации...» [199–202], так и внесены дополнения и изменения в действующие нормативные документы [198] и Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожара [3] в виде специального приложения.

На основании результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, разработан проект документа – «Методические рекомендации по оценке водоотдачи сетей НППВ», текст которого приведен в Приложении А. В общем случае структура проектов Приложений в СП [198] и «Методических рекомендаций...» [3] может выглядеть так:

1. Общие положения (что устанавливают и предусматривают, для кого предназначены и т.п.).
2. Нормативные ссылки и справочная литература (ГОСТы, СП и др.).
3. Основные понятия и определения (в т.ч. используемые сокращения).
4. Расчётная оценка водоотдачи сетей НППВ (основные положения гидродинамики жидкости, математические соотношения для моделирования ТС и КС НППВ, оценка водоотдачи при повреждении трубопроводов).
5. Примеры расчётных оценок водоотдачи.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Таким образом, в 4-й главе приведены результаты компьютерного эксперимента по водоотдаче КС и ТС НППВ при различных вариантах задействования ПГ на основе разработанных расчетных моделей и метода расчетного моделирования водоотдачи систем НППВ. При этом использована хорошо апробированная и используемая многими специалистами программа MathCad. Результаты компьютерного эксперимента позволили уточнить таблицу водоотдачи сетей НППВ, приводимую в справочниках РТП, с учетом как гидравлических характеристик сетей НППВ, таких как диаметры, шероховатость труб и перепады высот местности, так и возможностей насосных станций, числа и взаиморасположения задействованных пожарных гидрантов. При помощи полученных расчетных моделей можно адекватно давать оценку водоотдачи сетей НППВ с использованием метода расчетного моделирования и выведенных аналитических выражений для оценки водоотдачи кольцевых и тупиковых сетей НППВ.

Сформулированы предложения по внесению дополнений и изменений в нормативные документы по уточнённой оценке водоотдачи сетей НППВ и разработан проект самостоятельного документа – «Методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей НППВ», текст которого приводится в Приложении А.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализирована статистика по крупным пожарам на предприятиях НХП, показана критическая важность использования сетей НППВ для обеспечения больших расходов воды на тушение таких пожаров и выявлена проблема возможной недостаточности водоотдачи для их ликвидации, в то время как, согласно документов предварительного планирования и информации из справочника РТП по оценке водоотдачи сети НППВ, расход воды признается достаточным.

2. Разработаны и обоснованы расчётные модели водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей НППВ с учётом характеристик насосных станций и участков трубопроводов, перепадов высот на местности, количества и расположения задействуемых ПГ.

3. Разработаны методы компьютерного моделирования водоотдачи кольцевых и тупиковых сетей НППВ для количественной оценки водоотдачи как отдельно взятых ПГ, так и сетей в целом, для чего использованы современные пакеты компьютерных программ и аналитические подходы. Проведены компьютерные эксперименты по оценке водоотдачи задействуемых ПГ и сетей НППВ в штатных режимах работы и в условиях повреждений при тушении крупных пожаров на предприятиях НХП.

4. Сформулировано и обосновано понятие живучести сети НППВ в условиях повреждающего воздействия на неё факторов ЧС природного и техногенного характера.

5. Показана необходимость совершенствования соответствующих нормативных документов, для чего разработан проект «Методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей НППВ» и предложено внести дополнения в действующие нормативные документы по уточнённой оценке водоотдачи сетей НППВ и в «Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожаров», а также составлять паспорта водоотдачи для сетей НППВ на предприятиях НХП. Обоснована возможность применения

разработанных моделей и методов оценки водоотдачи сетей НППВ не только для предприятий НХП, но и для других объектов, где возможны пожары по повышенному рангу.

6. Показано, что разработанные модели и методы могут применяться для оценки водоотдачи сетей НППВ при возможных вариантах расстановки пожарной техники при тушении крупных пожаров различных объектов с учётом количества задействованных ПГ, гидравлических, геометрических параметров и конфигурации сети НППВ, коэффициентов сопротивления, удаленности ПГ от насосных станций, перепадов высот местности, расхода из стволов, подаваемых от конкретных пожарных автомобилей и т.д. Разработанные модели и методы также могут быть использованы в учебном процессе ВУЗов, готовящих специалистов в области пожарной безопасности.

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АС – аварийная ситуация

АСР – аварийно-спасательные работы

АЦ – автоцистерна

ВМП – воздушно-механическая пена

ВС – водопроводная сеть

ГЖ – горючая жидкость

КС – кольцевая сеть

ЛВЖ – легковоспламеняющаяся жидкость

ЛПДС – линейная производственно-диспетчерская станция

НППВ – наружное противопожарное водоснабжение

НПП – нефтеперерабатывающая промышленность

НС – насосная станция

НРХ – напорно-расходная характеристика

НХП – нефтехимическая промышленность

НПЗ – нефтеперерабатывающий завод

НХЗ – нефтехимический завод

ОТВ – огнетушащее вещество

ПА – пожарный автомобиль

ПВ – пожарный водоем

ПГ – пожарный гидрант

ПЛАС – план ликвидации аварийной ситуации

ПО – пожарная охрана

ППЗ – противопожарная защита

ПТУ – пожарно-тактическое учение

ПТП – план тушения пожара

ПЧ – пожарная часть

РВС – резервуар вертикальный стальной

РВСПК – резервуар с плавающей крышей

- РВСП – резервуар с понтоном
- РТП – руководитель тушения пожара
- СНГ – сжиженный нефтяной газ
- СПГ – сжиженный природный газ
- СиС – силы и средства
- ТО – технологическое оборудование
- ТС – тупиковая сеть
- ТУ – технологические установки
- ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
- УВ – углеводороды
- ЧС – чрезвычайная ситуация

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 31.12.2015 № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Москва. Кремль. 31 декабря 2015 года.
2. Сергеев В.С. Чрезвычайные ситуации и защита населения [Электронный ресурс]: терминологический словарь / В.С. Сергеев – Электронные текстовые данные. – Саратов: Вузовское образование, 2014. – 348 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/26241>. – ЭБС «IPRbooks»
3. Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожаров: [указание МЧС России от 27.02.2013 г. № 2-4-87-1-18]. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499028650>
4. Иванников, В.П. Справочник руководителя тушения пожара / В.П. Иванников, П.П. Ключ. – М.: Стройиздат, 1978. – 288 с.
5. Конь, М.Я. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность за рубежом: справочное пособие / М.Я. Конь, Е.М. Зелькинд, В.Г. Шершун. – М.: Химия, 1986. – 184 с.
6. Капустин, В.М. Нефтеперерабатывающая промышленность США и бывшего СССР / В.М. Капустин, С.Г. Кукес, Р.Т. Бертолусини – М.: Химия, 1995. – 304 с.
7. Брагинский, О.Б. Мировая нефтехимическая промышленность / О.Б. Брагинский. – М.: Наука, 2003. – 556 с.
8. Агабеков, В.Е. Нефть и газ. Технологии и продукты переработки / В.Е. Агабеков, В.К. Косяков – Минск: Белорусская наука, 2011. – 459 с.
9. Капустин, В.М. Основы проектирования нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий: учебник и учебные пособия для студентов высших учебных заведений / В.М. Капустин, М.Г. Рудин, А.М. Кудинов – М.: Химия (РГУ нефти и газа им. Губкина), 2012. – 440 с.

10. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев; МЧС России. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
11. Егоров, А.Ф. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / А.Ф. Егоров, Т.В. Савицкая. – М.: КолосС, 2010. – 526 с.
12. Егоров, А.Ф. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий / А.Ф. Егоров, Т.В. Савицкая. – М.: КолосС, 2004. – 416 с.
13. Коньк, О.А. Аварии и аварийные ситуации на промышленных предприятиях [Электронный ресурс]: учебное пособие / О.А. Коньк. – Электронные текстовые данные. – Сыктывкар: СЛИ, 2013. – 107 с. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>.
14. Собурь, С.В. Пожарная безопасность нефтегазохимических предприятий: справочник / С.В. Собурь. – М.: Пожкнига, 2004. – 432 с.
15. Воробьев, Ю.Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов. – М.: Ин-октаво, 2005. – 368 с.
16. Храмцов, Б.А. Промышленная безопасность опасных производственных объектов: учебное пособие / Б.А. Храмцов, А.П. Гаевой, И.В. Дивиченко – Белгород: Белгородский ГТУ, 2007. – 187 с.
17. Александров, А.А. Обеспечение безопасности эксплуатации объектов хранения углеводородных топлив / А.А. Александров. – М.: Наука, 2007. – 149 с.
18. Собурь, С.В. Пожарная безопасность организаций нефтегазохимического комплекса. Часть 1: справочник / С.В. Собурь. – М.: Пожкнига, 2011. – 264 с.
19. Бард, В.Л. Предупреждение аварий в нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах / В.Л. Бард, А.В. Кузин – М.: Химия, 1984. – 248 с.

20. Козлитин, А.М. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование, анализ и оценка опасностей техносферы: учеб. пособие / А.М. Козлитин П.А. Козлитин. – Саратов: Издательский Дом «Райт Экспо», 2013. – 136 с.
21. Бесчастнов, М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.В. Бесчастнов. – М.: Химимя, 1991. – 432 с.
22. Nolan D. P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities / Gulf Professional Publishing, Elsevier. – 2011. – 351 p.
23. Загидуллин, С.Х. Основное технологическое оборудование нефтеперерабатывающих заводов: учебное пособие / С.Х. Загидуллин, И.Г. Ложкин, А.В. Беляев. – Пермский ГТУ – Пермь, 2010. – 117 с.
24. Бушуев, В.В. Нефтяная промышленность России – сценарии сбалансированного развития / В.В. Бушуев и др. – М.: Энергия, Институт энергетической стратегии, 2010. – 160 с.
25. Мастепанов, А.М. Топливо–энергетический комплекс России на рубеже веков – состояние, проблемы и перспективы развития: справочно–аналитический сборник / А.М. Мастепанов – 3-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука, 2010. – 793 с.
26. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года / прил. к обществ.-дел. журналу «Энергетическая политика» – М.: ГУ Институт энергетической стратегии, 2010 – 184 с.
27. Распоряжение Правительства РФ от 18 мая 2016 года №954-р «Об утверждении плана реализации Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года». – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/23136/>
28. Бондаренко, Б.И. Альбом технологических схем процессов переработки нефти и газа / Б.И. Бондаренко – М.: Химия, 1983. – 128 с.

29. Коннова, Г.В. Оборудование транспорта и хранения нефти и газа: учебное пособие / Г.В. Коннова. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 128 с.
30. Едигаров, С.Г. Проектирование и эксплуатация нефтебаз и газохранилищ / С.Г. Едигаров, С.А. Бобровский. – М.: Недра, 1973. – 367 с.
31. Рудин, М.Г. Общезаводское хозяйство нефтеперерабатывающего завода / М.Г. Рудин, Г.А. Арсеньев, А.В. Васильев. – Л.: Химия, 1978. – 312 с.
32. Marcilly C. Evolution of refining and petrochemicals: what is the place of zeolites //Oil & gas science and technology. – 2001. – Vol. 56. – №. 5. – P. 499-514.
33. Shigabutdinov A., Yafizova D. Revisiting the issue of the long-run competitiveness of the National Petrochemical Complex //Life Science Journal. – 2014. – Vol. 11. – №. 8 – P. 168-171.
34. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». Серия 09. Выпуск 38 / Колл. авт. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 44 с.
35. Рекомендации по разработке планов локализации и ликвидации аварий на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах. Серия 09. Выпуск 35. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 56 с.
36. Руководство по безопасности для нефтебаз и складов нефтепродуктов. Серия 09. Выпуск 33. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 60 с.
37. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Серия 03. Выпуск 69. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с.
38. Руководство по безопасности для складов сжиженных углеводородных газов и легковоспламеняющихся жидкостей под давлением.

Серия 09. Выпуск 34. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 56 с.

39. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств». Серия 09. Выпуск 37. 2-е изд., доп. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 126 с.

40. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности». Серия 08. Выпуск 19. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 288 с.

41. Правила противопожарного режима в Российской Федерации утвержденные постановлением Правительства РФ от 25 апреля 2012 г. №390. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – М.: Издательский дом ЭНЕРГИЯ, Альвис, 2012. – 120 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/22724>. – ЭБС «IPRbooks»

42. Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.94 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности». – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5438/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/)

43. Федеральный закон Российской Федерации от 21.07.97 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_15234/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/)

44. Федеральный Закон Российской Федерации от 22.07.08 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_78699/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/)

45. СП 4.13130.2013 Ограничение распространения пожара на объектах защиты. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru/document/3743528>

46. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_163409/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163409/)

47. СНиП 2.11.03-93 Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001020>

48. ГОСТ 12.1.004-91\* (ред. от 01.10.1993) Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>

49. ГОСТ 12.1.033-81 (ред. от 26.08.1983) Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Термины и определения. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12-1-033-81-ssbt>

50. ГОСТ Р 22.8.01-96 (ред. от 31.05.2000) Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Ликвидация чрезвычайных ситуаций. Общие требования. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-22-8-01-96>

51. ВУПП-88 Ведомственные указания по противопожарному проектированию предприятий, зданий и сооружений нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200034005>

52. ППБО-85. Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности / сост.: В.И. Хоботько, А.С. Агаев, И.С. Марченко и др. – М.: Недра, 1987. – 152 с.

53. ВНТП 5-95. Нормы технологического проектирования предприятий по обеспечению нефтепродуктами (нефтебаз). – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200006901>
54. Обеспечение пожарной безопасности предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: [указание МЧС России от 13.05.2004 г. № 18-5-12-25]. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.alppp.ru/law/bezopasnost-i-ohrana-pravoporjadka/28/obespechenie-pozharnoj-bezopasnosti-predpriyatij-neftepererabatyvayuschej-i-neftehimichesk.pdf>
55. Мировая пожарная статистика / Н.Н. Брушлинский, П. Вагнер, С.В. Соколов, Д. Холл. – М.: АГПС МЧС России, 2004. – 126 с.
56. Пожары в России и в мире. Статистика, анализ, прогнозы / Е.М. Алёхин, Н.Н. Брушлинский, П. Вагнер, Ю.И. Коломиец, С.А. Лупанов, С.В. Соколов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. – 158 с.
57. Шароварников, А.Ф. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, С.А. Шароварников. – М.: Калан, 2002. – 448 с.
58. Хуснутдинов, Д.З. Аварийные взрывы газоздушных смесей в атмосфере: монография / Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев, В.В. Казеннов, А.А. Комаров, Н.В. Громов. – М.: Московский ГСУ, 2014. – 80 с.
59. Авдотьян, В.П. Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: монография / В.П. Авдотьян, М.М. Дзыбов, К.П. Самсонов. – МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. – 468 с.
60. Шаптала, В.Г. Основы моделирования чрезвычайных ситуаций: учебное пособие / В.Г. Шаптала, В.Ю. Радоуцкий, В.В. Шаптала; под общ. ред. В.Г. Шапталы. – Белгород: Белгородский ГТУ, 2010. – 166 с.

61. Акимов, В.А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
62. Маршалл, В. Основные опасности химических производств: пер. с англ. / под ред. Б.Б. Чайванова, А.Н. Черноплекова. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
63. Алексеев, С.В. Обустройство резервуарных парков: монография / С.В. Алексеев, В.А. Алексеев, С.И. Поникаров. – Казань: Казанский ГТУ, 2010. – 92 с.
64. Волков, О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами / О.М. Волков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 398 с.
65. Анализ аварий и несчастных случаев в нефтегазовом комплексе России: учебное пособие / под ред. Б.Е. Прусенко., В.Ф. Мартынюка. – М.: ООО «Анализ опасностей», 2007. – 309 с.
66. Брушлинский, Н.Н. Моделирование пожаров и взрывов / под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.
67. Кочетков, К.Е. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: учебное пособие в 3-х книгах. Книга 1 / под общ. ред. К.Е. Кочеткова, В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. – М.: Ассоциация строительных вузов, 1995. – 320 с.
68. Шойгу, С.К. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций / С.К. Шойгу – М.: Дизайн. Информация. Картография, 2010. – 640 с.
69. Семейко, Е. А. Анализ обстановки с пожарами и последствий от них на территории Российской Федерации за 2015 год (по материалам Департамента надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России) // Вестник ВИ ГПС МЧС России. – 2016. – №1. – С.52-61. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-obstanovki-s-pozharami-i-posledstviy-ot-nih-na-territorii-rossiyskoy-federatsii-za-2015-god-po-materialam-departamenta-nadzornoj>

70. Межгосударственный совет стран СНГ по промышленной безопасности [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: [http://www.mspbsng.org/stat\\_accident](http://www.mspbsng.org/stat_accident)

71. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru>

72. Хыонг, Н.М. О расчете сил и средств пожарных подразделений на начальном этапе тушения пожаров на объектах нефтепереработки [Электронный ресурс] / Н.М. Хыонг, А.Н. Денисов // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 4. – С. 1-6. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2010-4/04-04-10.ttb.pdf>

73. Сычев, Я.В. Опасности техногенных катастроф современности [Электронный ресурс] / Я.В. Сычев // Технологии техносферной безопасности. – 2012. – № 1. – С. 1-9. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2012-1/05-01-12.ttb.pdf>

74. Горбунов, С.В. Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера / С.В. Горбунов, Ю.Д. Макиев, В.П. Малышев // Технологии гражданской безопасности. – 2012. – № 1. – С. 70-79.

75. Большаков, А.М. Определение возможных сценариев возникновения, развития и вероятности реализации аварийных ситуаций на резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов при низких температурах эксплуатации / А.М. Большаков, М.И. Захарова // Проблемы анализа риска. – 2012. – № 3. – С. 22-33.

76. Минин, И.В. Разработка средств автоматизации и прогнозирования развития чрезвычайной ситуации на нефтеперерабатывающем заводе [Электронный ресурс] / И.В. Минин // Вестник кибернетики. – 2013. – № 12. – С. 23-29. – Режим доступа: [http://www.ipdn.ru/rics/vk/\\_private/vk12/23-29.pdf](http://www.ipdn.ru/rics/vk/_private/vk12/23-29.pdf)

77. Лебедева, М.И. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [Электронный ресурс] / М.И. Лебедева, А.В. Богданов, Ю.Ю.

Колесников // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 4. – С. 1-11. – Режим доступа: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-4/20-04-13.ttb.pdf>

78. Бастриков, Д.Л. Комбинированный способ тушения пожаров автомобильных бензинов в вертикальных стальных резервуарах [Электронный ресурс] / Д.Л. Бастриков, С.С. Воевода, В.П. Молчанов, А.Ф. Шароварников // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 6. – С. 1-7. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2013-6/18-06-13.ttb.pdf>

79. Карпенчук, И.В. Расчет сил и средств при тушении пожаров в резервуарах нефтепродуктов с применением лафетных стволов / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова, В.А. Шкутник // Вестник НЦ БЖД. – 2014. – № 1. – С. 88-93.

80. Клубань, В.С. Пожарная безопасность особо важных объектов топливно-энергетического комплекса [Электронный ресурс] / В.С. Клубань, С.В. Молчанов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 3. – С. 1-8. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-3/23-03-14.ttb.pdf>

81. Абдрахманов, Н.Х. Моделирование сценариев развития аварийных ситуаций для нестационарных опасных производственных объектов нефтегазового комплекса [Электронный ресурс] / Н.Х. Абдрахманов, К.Н. Абдрахманова, В.В. Ворохобко, Р.Н. Абдрахманов, А.Р. Басырова // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 5. – С. 516-530. – Режим доступа: [http://www.ogbus.ru/issues/5\\_2015/ogbus\\_5\\_2015\\_p516531\\_AbrakhmanovNKh\\_ru.pdf](http://www.ogbus.ru/issues/5_2015/ogbus_5_2015_p516531_AbrakhmanovNKh_ru.pdf)

82. Шимко, В.Ю. Новые средства обеспечения пожаровзрывобезопасности в нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс] / В.Ю. Шимко // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 1. – С. 1-5. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-1/12-01-15.ttb.pdf>

83. Горячев, С.А. Пожарная безопасность технологических процессов: учебник / С.А. Горячев, С.В. Молчанов, В.П. Назаров и др.; гриф МЧС России. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 221 с.

84. Хорошилов, О.А. Пожарная безопасность технологических процессов: учебное пособие / О.А. Хорошилов, М.Т. Пелех, Г.В. Бушнев, А.В. Иванов под общ. ред. В.С. Артамонова – СПб: Санкт-Петербургский УГПС МЧС России, 2012. – 300 с.

85. Баранин, В.Н. Экономика чрезвычайных ситуаций и управление рисками: учебное пособие / В.Н. Баранин под ред. А.Я. Корольченко. – М.: ООО «Пожнаука», 2004. – 330 с.

86. Швырков, С.А. Статистика квазимгновенных разрушений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / С.А. Швырков, С.А. Горячев, В.П. Сорокоумов, С.В. Батманов, В.В. Воробьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – № 6. – С. 48-52.

87. Давыдкин, С.А. Анализ аварий на объектах нефтегазовой промышленности [Электронный ресурс] / С.А. Давыдкин, А.Ю. Намычкин // Технологии техносферной безопасности. – 2007. – № 6. – С. 1-7. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2007-6/06-06-07.ttb.pdf>

88. Швырков, С.А. Анализ последствий чрезвычайных ситуаций при разрушениях резервуаров на объектах топливно-энергетического комплекса / С.А. Швырков, С.В. Батманов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – № 4. – С. 2-7.

89. Бараковских, С.А. Анализ аварийности по причине пожаров на резервуарных парках / С.А. Бараковских, К.Ю. Якименко, В.И. Берг // Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 10-летию со дня основания института транспорта тюменского государственного нефтегазового университета «Проблемы эксплуатации систем транспорта». – Тюмень: Тюменский ГНУ, 2009.

90. Репин, А.Г. Краткий толковый словарь по газу и нефти (Brief gasoil glossary) / А.Г. Репин под общ. ред. д.т.н. Р.О. Самсонова – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ВНИИГАЗ, 2008. – 154 с.

91. Liu X. Y. The Petrochemical Park Fire Safety Planning Study Based on Fire Risk Analysis // *Advanced Materials Research*. 2012. – Vols. 518-523, P. 1045-1051. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.1045.
92. Wan H. B., Yun Y. X. Study on Fire Safety Planning in Chinese Petrochemical Industry Parks // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vols. 260-261. – P. 279-283. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.260-261.279.
93. Xuanya Liu, Qinglin Zhang, Xiaoyuan Xu. Petrochemical Plant multi-Objective and multi-Stage fire Emergency Management Technology System Based on the fire risk Prediction // *9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. 2013. – Vol. 62. – P. 1104-1111. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.167.
94. Yi-fei Meng, Dong-feng Zhao, Zhi-qiang Zhao. Preliminary Study on Safety Performance Evaluation of Petrochemical Plant Layout // *International Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering*. 2013. – Vol. 52. – P. 277-283. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.140.
95. Liu X. Y., Wang X. Z. Fire Risk Forecast and Early Warning Technology for Large Oil and Gas Storage & Transport Tank Areas // *Advanced Materials Research*. 2013 – Vols. 726-731. – P. 4654-4659. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.4654.
96. Li J., Wang Y., Lin L. Risk assessment study of fire following an earthquake: a case study of petrochemical enterprises in China // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. – Vol. 14. – P. 891-900. DOI: 10.5194/nhess-14-891-2014.
97. Peng S. T., Sun Y., Zhou R., Wang X. L., Guan W. L. Assessments on Fire and Explosion of Petrochemical Wharf Storage Tank Area Using DOW Method and Fuzzy Comprehensive Evaluation Model // *Applied Mechanics and Materials*. 2014 – Vols. 638-640. – P. 1986-1992. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.638-640.1986.
98. Tobias I Ndubuisi Ezejiolor. Risk Assessment: Re-appraisals for Potential Hazards in the Operational Environment and Facilities of Petroleum Refining and

Distribution Industry in Nigeria - Research and Review // Occup Med Health Aff. 2014. – Vol. 2. – P. 1-19. DOI: 10.4172/2329-6879.1000187.

99. Mehrzad Ebrahemzadih, Afshin Maleki, Ebrahim Darvishi, Mehdi Meimanat Abadi, Saeed Dehestaniathar. The Analysis of Process Accidents Due to Risks in the Petrochemical Industries – The Case Study of Radiation Intensity Determination Proportional to Distance from Tank Level // Open Journal of Safety Science and Technology. 2015. – Vol. 5, No. 2 – P. 21-26. DOI: 10.4236/ojsst.2015.52003.

100. Пивоваров, Н.Ю. Оценка экономического ущерба и обоснование риска возникновения крупных пожаров на предприятиях нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности / А.А. Таранцев, Н.Ю. Пивоваров, Г.Л. Шидловский // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – № 3. – С. 38-44.

101. Терещнев, В.В. Промышленные здания и сооружения. Серия «Противопожарная защита и тушение пожаров». Книга 2 / В.В. Терещнев, Н.С. Артемьев, Д.А. Корольченко, А.В. Подгрушный, В.И. Фомин, В.А. Грачев. – М.: Пожнаука, 2006. – 412 с.

102. Шаммазов, А.М. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций: учебник для вузов / А.М. Шаммазов, В.Н. Александров, А.И. Гольянов и др. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 404 с.

103. Баратов, А.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1979. – 368 с.

104. Староверов, С.В. Водоснабжение промышленных предприятий / С.В. Староверов, В.М. Киреев. – Белгород: Белгородский ГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. – 93 с.

105. Пожаротушение в промышленных зданиях и сооружениях: учебное пособие / В.В. Терещнев, Н.С. Артемьев, А.В. Подгрушный, В.А. Грачев. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 124 с.

106. Решетов, А.П. Пожарная тактика: учебное пособие / А.П. Решетов, А.В. Башаричев, В.В. Ключ; под общ. ред. В.С. Артамонова. – СПб.: Санкт-Петербургский Университет ГПС МЧС России, 2011. – 324 с.
107. Однолько, А.А. Пожарная тактика. Планирование и организация тушения пожаров: курс лекций / А.А. Однолько, С.А. Колодяжный, Н.А. Старцева. – Воронеж: Воронежский ГСУ, 2012. – 145 с.
108. Самойлов, Д.Б. Справочник инженера пожарной охраны: учебно–практическое пособие / Д.Б. Самойлов и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. – 864 с.
109. Колбашев, А.А. Справочник противопожарного водоснабжения г. Санкт–Петербурга / А.А. Колбашев, Е.В. Ершов, Р.А. Прокопенко, И.А. Белоножко – СПб: Главное Управление МЧС России по Санкт-Петербургу, 2014. – 342 с.
110. Lang Xu-qing, Liu Quan-zhen. Study of Fire Fighting System to Extinguish Full Surface Fire of Large Scale Floating Roof Tanks // The 5th Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering. – 2011. – Vol. 11. – P. 189-195. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.646.
111. Гришенцев, А.Ю. Теория и практика технического и технологического эксперимента: учебное пособие / А.Ю. Гришенцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 102 с.
112. Новицкий, Н.Н. Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация: монография / Н.Н. Новицкий, М.Г. Сухарев, А.Д. Тевяшев и др. – Новосибирск: Наука, 2010. – 419 с.
113. Новицкий, Н.Н. Трубопроводные системы энергетики: методические и прикладные проблемы математического моделирования / Н.Н. Новицкий, М.Г. Сухарев, А.Д. Тевяшев и др. – Новосибирск: Наука, 2015. – 476 с.
114. Щербаков, В.И. Моделирование систем подачи и распределения воды / В.И. Щербаков, М.Я. Панов, И.С. Квасов, С.А. Сазонова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 10. – С. 18-20.

115. Мисевич, Ю.В. О порядке расчета тупиковых гидравлических сетей / Ю.В. Мисевич, А.А. Таранцев, К.Ю. Шилин // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – № 1. – С. 141-146.
116. Мисевич, Ю.В. О влиянии негерметичности гидромагистралей на их водоотдачу при тушении пожаров / Ю. В. Мисевич, О. В. Петрова, А.А. Таранцев // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2010. – №1. – С.13-22.
117. Харченко, О.А. Оптимизация систем водоснабжения промышленных предприятий / О.А. Харченко, Г.Н. Матвеева. В.Н. Михайловский // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – № 1. – С. 70-74.
118. Мельник, Е.А. Гидравлическая модель в системе управления водопроводной сетью Санкт-Петербурга / Е.А. Мельник, М.М. Хямяляйнен, С.В. Смирнова, М.Ю. Юдин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 3. – С. 20-23.
119. Лобов, Б.Н. Результаты моделирования системы водоснабжения населенного пункта / Б.Н. Лобов, П.Г. Колпахчян, Р.Б. Лобов, Л.И. Лавронова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 36-41.
120. Белова, О.В. Метод контрольного объема для расчета гидравлических сетей / О.В. Белова, В.Ю. Волков, А.П. Скибин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 5. – С. 46-60.
121. Михайловский, Е.А. Модифицированный метод узловых давлений для расчета потокораспределения в гидравлических цепях при нетрадиционных замыкающих соотношениях / Е.А. Михайловский, Н.Н. Новицкий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2015. – № 2. – С. 30-42.

122. Балышев, О.А. Задачи регулирования в разветвленных гидравлических цепях / О.А. Балышев, С.О. Балышев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – № 5. – С. 135-151.

123. Кикинёв, В.В. Особенности представления систем противопожарного водоснабжения в MATLAB-SIMULINK-SIMHYDRAULICS / В.В Кикинёв, О.Е. Дегтерев // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». – Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС РФ, 2015.

124. Саркисов, С.В. Методика оптимизации систем водоснабжения / Саркисов С.В., Путилин П.А., Ивановский В.С., Игнатчик В.С // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2015. – Вып. 649. – С.181-187.

125. Пивоваров, Н.Ю. Моделирование систем наружного противопожарного водоснабжения для оценки достаточности водоотдачи при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности [Электронный ресурс] / Н.Ю. Пивоваров, А.А. Таранцев // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2013. – № 4. – С. 80-87 – Режим доступа: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V54/13.pdf>.

126. Груданова, О.В. Аналитический метод гидравлического расчета автоматических установок водяного пожаротушения в градостроительстве: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Груданова Ольга Витальевна – СПб., 2006. – 124 с.

127. Мисевич, Ю.В. Разработка методик гидравлического расчета системы внутреннего противопожарного водоснабжения зданий и сооружений с учетом аварийных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Мисевич Юлия Владимировна. – СПб., 2010. – 107 с.

128. Артамонов, В.С. Применение математических методов и новых информационных технологий в научных исследованиях. Учебно-методическое пособие / В.С. Артамонов, В.Е. Кадулин, В.Д. Мулишкин, А.Б. Трофимов, А.А.

Чернышев, А.П. Чуприян под ред. В.П. Сальникова. – Спб.: Фонд «Университет», 2001. – 72 с.

129. Kanta L., Zechman E., Brumbelow K. Multiobjective evolutionary computation approach for redesigning water distribution systems to provide fire flows // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2011. – Vol. 138. – No. 2. – P. 144-152. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000156.

130. Kanta L., Brumbelow K. Vulnerability, risk, and mitigation assessment of water distribution systems for insufficient fire flows // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2012. – Vol. 139. – No. 6. – P. 593-603. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000281.

131. Fu G. et al. Optimal design of water distribution systems using many-objective visual analytics // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2012. – Vol. 139. – No. 6. – P. 624-633. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000311.

132. Bristow E. C., Brumbelow K. Simulation to aid disaster planning and mitigation: Tools and techniques for water distribution managers and emergency planners // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2012. – Vol. 139. – No. 4. – P. 376-386. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000283.

133. Walski T. et al. An overview of water demand: Volume vs. Pressure based demands // *WDSA 2012: 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, 24-27 September 2012 in Adelaide, South Australia*. – Engineers Australia. 2012. – P. 1392.

134. Di Nardo A. et al. Performance indices for water network partitioning and sectorization // *Water Science and Technology: Water Supply*. – 2015. – Vol. 15. – No. 3. – P. 499-509. DOI: 10.2166/ws.2014.132.

135. Schwartz, R., Housh, M., Ostfeld, A. Limited Multistage Stochastic Programming for Water Distribution Systems Optimal Operation // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000687.

136. Kanakoudis V. K., Tolikas D. K. Assessing the performance level of a water system //Water, Air and Soil Pollution: Focus. – 2004. – Vol. 4. – №. 4-5. – P. 307-318.
137. Kwon H. J. Computer simulations of transient flow in a real city water distribution system //KSCE Journal of Civil Engineering. – 2007. – Vol. 11. – №. 1. – P. 43-49.
138. Ratnayaka D. D. et al. Water supply. – Butterworth-Heinemann, 2009.
139. Sibly H. Efficient urban water pricing //Australian Economic Review. – 2006. – Vol. 39. – №. 2. – P. 227-237.
140. Snyder J. K. Impacts of fire flow on distribution system water quality, design, and operation. – American Water Works Association, 2002.
141. Juuti P., Katko T. Water, time and European cities //History matters for the futures. Tampere, Finland: Tampere University Press. – 2005.
142. Таранцев, А.А. Уточнённый порядок расчёта одноуровневых разветвлённых гидравлических сетей / В.С. Артамонов, О.В. Груданова, А.А. Таранцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 3. – С. 77-83.
143. Абрамов, Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
144. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение / Н.Н. Абрамов. – учебник для вузов, 2-е изд. перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1974. – 480 с.
145. Цыбин, Л.А. Гидравлика и насосы / Л.А. Цыбин, И.Ф. Шанаев. – М.: Высшая школа, 1976. – 256 с.
146. Турк, В.И. Насосы и насосные станции / В.И. Турк, А.В. Минаев, В.Я. Карелин. – М.: Стройиздат, 1976. – 304 с.
147. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1982. – с. 224.
148. Чугаев, Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

149. Абрамов, Н.Н. Расчет водопроводных сетей: учебное пособие для вузов / Н.Н. Абрамов, М.М. Пospelова, М.А. Сомов и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1983. – 278 с.
150. Иванов, Е.Н. Противопожарное водоснабжение / Е.Н. Иванов. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.
151. Дмитриев, В.Д. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения / В.Д. Дмитриев, Д.А. Коровин, А.И. Кораблев, Г.П. Медведев, Б.Г. Мишуков, М.П. Наумов, Г.С. Чистова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, 1988. – 383 с.
152. Лобачев, П.В. Насосы и насосные станции / П.В. Лобачев. – учеб. для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
153. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
154. Калицун, В.И. Основы гидравлики и аэродинамики: учебное пособие / В.И. Калицун, Е.В. Дроздов, А.С. Комаров, К.И. Чижик, 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 2001. – 296 с.
155. Кормашова, Е.Р. Проектирование систем водоснабжения и водоотведения зданий: учебное пособие / Е.Р. Кормашова. – Иваново: Ивановский ГАСУ, 2005. – 142 с.
156. Ловкис, З.В. Гидравлика: учебное пособие / З.В. Ловкис. – Минск: Белорусская наука, 2012. – 439 с.
157. Ильина, Т.Н. Гидравлика. Примеры расчетов элементов инженерных сетей: учебное пособие / Т.Н. Ильина. – Белгород: Белгородский ГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. – 150 с.
158. Лямаев, Б.Ф. Системы водоснабжения и водоотведения зданий: учебное пособие / Б.Ф. Лямаев, В.И. Кириленко, В.А. Нелюбов. – СПб.: Политехника, 2012. – 304 с.

159. Бабкин, В.Ф. Инженерные сети: учебное пособие / В.Ф. Бабкин, В.Н. Яценко, В.Ю. Хузин. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2012. – 96 с.
160. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета: Стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб / Ф.А. Шевелев. – изд. 5-е доп. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 116 с.
161. Бабин, Л.А. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов / Л.А. Бабин, Л.И. Быков, В.Я. Волохов. – М.: Недра, 1979. – 176 с.
162. Приказ Минпромэнерго РФ от 20.12.04 г. № 172 «Об утверждении Методики определения неучтенных расходов и потерь воды в системах коммунального водоснабжения». – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=LAW&n=92059&req=doc>
163. Абросимов, Ю.Г. Нормирование противопожарного водоснабжения для городов с населением более миллиона человек / Ю.Г. Абросимов, Л.Ю. Киселев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2008. – № 1. – С. 75-82.
164. Жучков, В.В. Нормирование расхода воды на пожаротушение в г. Москве [Электронный ресурс] / В.В. Жучков, Д.В. Хорев, Д.В. Васильев // Технологии техносферной безопасности. – 2013. – № 3. – С. 1-7. – Режим доступа: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-3/21-03-13.ttb.pdf>
165. Дерюшев, Л.Г. Нормирование расходов воды на наружное пожаротушение строений в населенных пунктах с зонным водоснабжением / Л.Г. Дерюшев, Н.Л. Дерюшева, Ха Хай Фам // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 7-13.
166. Анциферов, С.А. Апробация экспериментального стенда для определения гидравлического сопротивления шероховатой трубы / С.А. Анциферов, В.М. Филенков // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 6. – С. 10-15.
167. Сазонова, С.А. Методы обоснования резервов проектируемых гидравлических систем при подключении устройств пожаротушения / С.А.

Сазонова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2015. – № 4. – С. 22-26.

168. Пивоваров, Н.Ю. Расчетная оценка водоотдачи тупиковых сетей наружного противопожарного водоснабжения / А.А. Таранцев, Н.Ю. Пивоваров// Пожаровзрывобезопасность. 2012. – № 9. – С. 73-78.

169. Пивоваров, Н.Ю. Основы подготовки кадров в системе МЧС по вопросам оценки достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров / Н.Ю. Пивоваров // материалы VIII Международной научно–практической конференции «Подготовка кадров в системе предупреждения и ликвидации последствий ЧС». – СПб: Санкт–Петербургский университет ГПС МЧС России, 2013. – С. 80-81.

170. Пивоваров, Н.Ю. Моделирование водоотдачи кольцевых сетей наружного противопожарного водопровода / Н.Ю. Пивоваров, А.А. Таранцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – № 12. – С. 69-76.

171. Пивоваров, Н.Ю. Проблемы обеспечения и комплексной оценки достаточности водоснабжения для ликвидации аварий на предприятиях нефтехимической промышленности в условиях Арктики / Н.Ю. Пивоваров, А.А. Таранцев // материалы VI Международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Вопросы обеспечения комплексной безопасности деятельности в Арктическом регионе». – СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2014. – С. 148-151.

172. Пивоваров, Н.Ю. Применение методики моделирования для оценки достаточности водоснабжения при ликвидации аварий на предприятиях нефтехимической промышленности / Н.Ю. Пивоваров // материалы Международной научно–практической конференции «Нурлы жол – путь в будущее»: научное обеспечение безопасности и жизнедеятельности населения». – Казахстан, г. Кокшетау: Кокшетауский технический институт, 2015. – С. 197-200.

173. Пивоваров, Н.Ю. Проблемы оценки достаточности водоснабжения для тушения крупных пожаров на предприятиях нефтехимической

промышленности / Н.Ю. Пивоваров // материалы IV Международной научно-практической конференции «Проблемы техносферной безопасности-2015». – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2015. – С. 82-84.

174. Пивоваров, Н.Ю. Актуальные проблемы оценки достаточности водоснабжения для ликвидации аварий на предприятиях нефтехимической промышленности / Н.Ю. Пивоваров // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». – Воронеж: Воронежский Институт ГПС МЧС России, 2015. –С. 172-174.

175. Пивоваров, Н.Ю. Математическое моделирование систем наружного противопожарного водоснабжения при тушении пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности / Н.Ю. Пивоваров // материалы Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: теория и практика» «ЧС – 2015». – Республика Беларусь, г. Гомель: Гомельский инженерный институт, 2015. – С.167-169.

176. Пивоваров, Н.Ю. Способ подачи огнетушащей жидкости на охлаждение дыхательной арматуры и орошение резервуаров с нефтепродуктами / А.А. Таранцев, П.Н. Марухин, Н.Ю. Пивоваров, А.В. Матвеев // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2016. – № 3. – С. 62-66 – Режим доступа: <http://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V83/10.pdf>

177. Очков, В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов / В.Ф.Очков – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.

178. Walski T. M. A history of water distribution //Journal-American Water Works Association. – 2006. – Vol. 98. – №. 3. – P. 110-121.

179. Ильин, В.П. Экзапроблемы математического моделирования //В.П. Ильин / Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование – 2010. – №35 – С.29-40.

180. Виноградов, М.И. Математическая энциклопедия – том 3 / М.И. Виноградов – М.: Наука, 1982 г. – 1176 с.

181. Приказ МЧС РФ от 5 мая 2008 г. N 240 «Об утверждении Порядка привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, гарнизонов пожарной охраны для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» – Режим доступа: <http://base.garant.ru/193545/#ixzz4c8Tjn3vp>

182. Пивоваров, Н.Ю. Анализ водоотдачи кольцевой сети наружного противопожарного водоснабжения с учетом повреждений трубопроводов / Н.Ю. Пивоваров, А.А. Таранцев // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – № 6. – С. 66-78.

183. Храменков, С.В. Трубы из высокопрочного чугуна для систем водоснабжения и водоотведения: монография / С.В. Храменков, А.Д. Алиференков, О.Г. Примин. – М.: Московский ГСУ, 2015. – 192 с.

184. Сорокин, А.С. Математическое моделирование оценки надежности технологических систем / А.С. Сорокин // Вестник КузГТУ. – 2008. – №5. – С. 28-37

185. Игнатчик, В.С. Результаты исследования зависимости показателей безотказности трубопроводов сетей водоснабжения от материала и давления / В.С. Игнатчик., С.В.Саркисов, П.А.Путилин // Журнал, изданный по материалам международной конференции Евразийского союза ученых (ЕСУ). – 2015. – № 4. – С. 49-53.

186. Абрамов, Н.Н. Надежность систем водоснабжения / Н.Н. Абрамов. – 3-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 216 с.

187. Захаревич, М.Б. Повышение надежности работы систем водоснабжения на основе внедрения безопасных форм организации их эксплуатации и строительства: учебное пособие / М.Б. Захаревич, А.Н. Ким, А.Ю. Мартьянова. – СПб.: Санкт-Петербургский ГАСУ, 2011. – 62 с.

188. Ларионов, В.И. Анализ сейсмического воздействия на объекты трубопроводных систем транспортировки и хранения нефти и газа / В.И.

Ларионов, Г.М. Нигметов, С.П. Сущев, Н.И. Фролова, М.А. Шахраманьян // Материалы международной конференции «Влияние сейсмической опасности на трубопроводные системы в закавказском и каспийском регионах». – М.: ВНИИПО МЧС России, 2000.

189. Анциферов, С.А. Анализ влияния внутренней коррозии на эксплуатацию трубопроводов / С.А. Анциферов, Е.А. Усманова // Вестник НГИЭИ. – 2015. – №6. – С. 5-10.

190. Creaco E., Franchini M. Fast network multi-objective design algorithm combined with an a posteriori procedure for reliability evaluation under various operational scenarios // *Urban Water Journal*. – 2012. – Vol. 9. – No. 6. – P. 385-399. DOI: 10.1080/1573062X.2012.690432.

191. Marlow D. R., Beale D. J. Condition assessment of appurtenances: A water sector perspective // *Journal American Water Works Association*. – 2012. – Vol. 104. – No. 1. – P. 26-35. DOI: jamewatworass.104.1.e26.

192. Jackson S., Ferris T. L. J. Resilience principles for engineered systems // *Systems Engineering*. – 2013. – Vol. 16. – No. 2. – P. 152-164. DOI: 10.1002/sys.21228.

193. Maleki K., Pouya A. Numerical simulation of damage–Permeability relationship in brittle geomaterials // *Computers and Geotechnics*. – 2010. – Vol. 37. – No. 5. – P. 619-628.

194. Hwang H. H. M., Lin H., Shinozuka M. Seismic performance assessment of water delivery systems // *Journal of Infrastructure Systems*. – 1998. – Vol. 4. – No. 3. – P. 118-125.

195. Qi Y. A study on the reliability of fire water supply system in high-rise buildings // *Fire technology*. – 2002. – Vol. 38. – No. 1. – P. 71-79.

196. Haines Y. Y. et al. Reducing vulnerability of water supply systems to attack // *Journal of Infrastructure Systems*. – 1998. – Vol. 4. – No. 4. – P. 164-177.

197. Пивоваров, Н.Ю. Анализ достаточности водоотдачи для тушения крупных пожаров при моделировании сети противопожарного водоснабжения с

учетом повреждений трубопроводов / Н.Ю. Пивоваров // материалы Всероссийской научно-практической конференции «Системы обеспечения техносферной безопасности». – Таганрог: Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, 2016. – С.166-168.

198. СП 8.13130.2009 Источники наружного противопожарного водоснабжения. – [Электронный ресурс] / Электрон. текстовые данные. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/195661/>

199. Таранцев, А.А. О возможности совершенствования некоторых нормативных документов в области пожарной безопасности / А.А. Таранцев, И.Г. Малыгин, В.В. Ключ // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – №9. – С.13-21.

200. Пивоваров, Н.Ю. О разработке методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения / А.А. Таранцев, Н.Ю. Пивоваров, О.В. Петрова // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2017. – №1. – С. 31-45 – Режим доступа: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V91/5.pdf>

201. Надёжность и эффективность в технике Справочник в 10-и томах. Том 1. Методология, организация, терминология / Под ред. А.И.Рембеза. М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

202. Надёжность технических систем. Справочник / Под ред. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

203. ГОСТ 27-002-89 Надёжность в технике. Термины и определения (актуализированная версия 2018 г.)

204. Новый энциклопедический словарь. - М.: БРЭ, 2003.- 671 с.

205. ГОСТ 15.016-2016 Система разработки и поставки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению (применительно к машиностроению и приборостроению), п.3.6.

206. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сетей связи общего пользования.

## СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунок 1 – Схема системы городского наружного водоснабжения.....	5
Рисунок 2 – Принципиальная схема водоснабжения нефтеперерабатывающего завода.....	5
Рисунок 3 – Комплекс нефтехимического и нефтеперерабатывающего завода в Нижнекамске.....	17
Рисунок 4 – Структурная схема переработки нефти и нефтепродуктов.....	18
Рисунок 5 – Роль нефтехимической промышленности в мировой экономике.....	21
Рисунок 6 – Крупнейшие центры нефтехимической промышленности России.....	23
Рисунок 7 – Крупнейшие мировые импортеры нефтехимии и экспортные рынки России.....	24
Рисунок 8 – Дерево событий при возникновении аварийной ситуации на предприятии НХП.....	25
Рисунок 9 – Причины аварийных ситуаций в мире в обрабатывающих отраслях промышленности (а) и статистика по видам аварий на предприятиях НХП и НПП (б).....	27
Рисунок 10 – Генплан завода газопереработки и прилегающих улиц в Кливленде.....	28
Рисунок 11 - Пожар в Вильгельмсбурге.....	29
Рисунок 12 – Взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости: а - начальное состояние, б - через 1 час после начала пожара.....	30
Рисунок 13 – Развитие аварии 1 июня 1974 г. в Фликсборо.....	31
Рисунок 14 – Генплан хранилища СНГ компании РЕМЕХ.....	32
Рисунок 15 – Последствия разрушения преград при квазимгновенной разгерметизации резервуаров.....	34
Рисунок 16 – Пожар на НПЗ в Башкирии.....	35
Рисунок 17 – Технологический процесс предприятия НПП.....	37

Рисунок 18 – Блок-схема процедуры метода оценки водоотдачи кольцевой сети наружного противопожарного водоснабжения.....	53
Рисунок 19 – Схема расположения пожарных гидрантов на наружной кольцевой водопроводной сети.....	54
Рисунок 20 Гидравлические модели кольцевой сети НППВ при задействовании ПГ от одного до пяти (а – один ПГ, б – 2 ПГ, в – 3 ПГ, г – 4 ПГ, д – 5 ПГ).....	55
Рисунок 21 – Внешний вид насоса Grundfos CR.....	56
Рисунок 22 – Вид насосной станции.....	58
Рисунок 23 – Напорно-расходные характеристики насосов Grundfos CR.....	59
Рисунок 24 – Гидравлическая модель тупиковой сети НППВ с n гидрантами.....	59
Рисунок 25 – Блок-схема процедуры метода оценки водоотдачи тупиковой сети наружного противопожарного водоснабжения.....	60
Рисунок 26 – Зависимость интенсивности отказов чугунных труб от их диаметра и давления.....	69
Рисунок 27 – Зависимость интенсивности отказов стальных труб от их диаметра и давления.....	70
Рисунок 28 – Зависимость интенсивности отказов полиэтиленовых труб от их диаметра и давления.....	70
Рисунок 29 – Блок-схема процедуры метода оценки живучести кольцевой сети наружного противопожарного водоснабжения.....	72
Рисунок 30 – Модели кольцевой сети с двумя ПГ ( $N = 2$ ): а – нормальный режим; б – повреждение одного трубопровода; в, г – повреждение двух трубопроводов..	73
Рисунок 31 – Модели кольцевой сети с тремя ПГ ( $N = 3$ ) а – нормальный режим; б–г – повреждение одного трубопровода.....	73
Рисунок 32 – Модели кольцевой сети с тремя ПГ ( $N = 3$ ): д–и – повреждение двух трубопроводов.....	74
Рисунок 33 – Модели кольцевой сети с четырьмя ПГ ( $N = 4$ ) по схеме «2+2»: а – нормальный режим; б, в – повреждение одного трубопровода.....	74

Рисунок 34 – Модели кольцевой сети с четырьмя ПГ ( $N = 4$ ) по схеме «2+2»: г-ж – повреждение двух трубопроводов.....	75
Рисунок 35 – Окно ввода данных для расчёта водоотдачи КС НППВ для схемы изображенной на Рисунке 20.г (задействованы 4 ПГ) математическим пакетом MathCad.....	88
Рисунок 36 – Окно вывода данных для расчёта водоотдачи КС НППВ для схемы изображенной на Рисунке 20.г (задействованы 4 ПГ) математическим пакетом MathCad.....	89

## Приложение А

Проект

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ВОДОУДАЧИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

## 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Настоящие методические рекомендации (далее – МР) предусматривают комплексную оценку водоудачи сетей наружного противопожарного водоснабжения (НППВ).

1.2 МР устанавливают порядок оценки водоудачи систем НППВ на основе комплекса показателей (количества задействованных пожарных гидрантов (ПГ), расстояний между ними и насосными станциями (НС), перепадов высот местности и напорно-расходных характеристик (НРХ) насосов).

1.3 МР имеют рекомендательный характер, их применение возможно как дополнение к существующему порядку оценки водоудачи, установленному в справочниках руководителя пожара.

## 2 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ И СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В настоящих МР использованы ссылки на следующие нормативные документы и справочную литературу:

2.1.ГОСТ Р 53961-2010 Техника пожарная. Гидранты пожарные подземные. Общие технические требования. Методы испытаний.

2.2.ГОСТ 12.2.047-86 ССБТ. Пожарная техника. Термины и определения.

2.3.ГОСТ 12.1.033-81 ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.

2.4.ГОСТ 19185-73 Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения.

2.5.Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожаров: утв. МЧС России 01.03.2013 письмо № 43-956-18 — М., 2013.

2.6.Повзик Я.С. Справочник РТП. — М.: ЗАО «Спецтехника», 2004.

2.7.Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Энергия, 1975.

2.8.Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 368 с.

### 3 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Противопожарное водоснабжение** – комплекс инженерно-технических сооружений, предназначенных для забора и транспортирования воды, хранения ее запасов и использования их для пожаротушения.

**Насосная станция** – комплекс гидротехнических сооружений и оборудования для подъема воды насосами.

**Напор** – давление воды, выражаемое высотой водяного столба над рассматриваемым уровнем.

**Гидрант пожарный подземный** – устройство для отбора воды из водопроводной сети с помощью пожарной колонки для тушения пожара.

**Объемный расход** – объем жидкости, протекающий через живое сечение потока в единицу времени.

**Живучесть сети наружного противопожарного водоснабжения** – способность обеспечивать водоотдачу (полностью или частично) при повреждении некоторых её компонентов (трубопроводов, гидрантов и др.) вследствие внутренних (коррозия, броски давления и др.) или внешних (взрывы технологических установок, землетрясения и др.) причин.

#### Принятые сокращения

МР – методические рекомендации, КС – кольцевая сеть, ТС – тупиковая сеть, НРХ – напорно-расходная характеристика (насоса, насосной станции), НС – насосная станция, НППВ – наружное противопожарное водоснабжение, ПГ – пожарный гидрант, РТП – руководитель тушения пожара, ЧС – чрезвычайная ситуация.

## 4 ОЦЕНКА ВОДООТДАЧИ СЕТЕЙ НППВ

### 4.1 Основные положения, принятые при гидравлических расчетах

Для моделирования напорного течения в трубопроводе приняты следующие допущения:

а) жидкость несжимаемая, обладающая плотностью  $\rho$  (для воды  $\rho \approx 1000$  кг/м<sup>3</sup>) и кинематической вязкостью  $\nu$ ;

б) потери давления из-за трения и гидравлических сопротивлений при течении жидкости подчинены закону Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p = A Q^2, \quad (A1)$$

где  $Q$  – объемный расход;  $A$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Коэффициент гидравлического сопротивления  $A$  учитывает линейные и местные гидравлические потери на участке трубопровода между отводами и в отводе и может быть определен из выражения:

$$A = 0,5 \rho \sum_{i=1}^N \frac{\xi_{li} + \xi_{mi}}{F_i^2}, \quad (A2)$$

где  $N$  – количество отрезков трубопровода, образующих рассматриваемый участок;;  $\xi_{li}$  – коэффициент линейного сопротивления на  $i$ -ом отрезке трубопровода;  $\xi_{mi}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений на  $i$ -ом отрезке трубопровода;  $F_i$  – площадь проходного сечения трубопровода на  $i$ -ом отрезке трубопровода, м<sup>2</sup>.

Коэффициент линейного сопротивления для круглых труб находится по выражению:

$$\xi_{li} = \frac{\lambda L}{d} \quad (A3)$$

где  $L$ ,  $d$  – длина и диаметр трубопровод на  $i$ -ом отрезке;  $\lambda$  – коэффициент, зависящий от шероховатости стенок трубы и числа Рейнольдса, который может быть найден по справочной литературе или рассчитан по формуле Альтшуля:

$$\lambda \approx 0,11 \left( \frac{K_{\Delta}}{d} \right)^{0,25}, \quad (A4)$$

где  $K_s$  – абсолютная эквивалентная шероховатость стенок для труб из различных материалов;

в) известны НРХ насоса, которые для центробежно-осевого насоса имеют вид:

$$p(Q) = p_n - A_n Q^2, \quad (A5)$$

где  $p$ ,  $Q$  – давление и расход жидкости на выходе из насоса;  $p_n$ ,  $A_n$  – расходные параметры насоса;

г) источник и линия расположены на одинаковых (либо разных) уровнях, а линия представляет собой замкнутый (либо разомкнутый) горизонтальный в плане трубопровод с  $n$  отводами (кольцевую либо тупиковую сеть).

д) при параллельном включении  $m$  однотипных насосов их общая НРХ также имеет вид (A5), но коэффициент  $A_n$  уменьшается в  $m^2$  раз; при последовательном включении значения  $A_n$  и  $p_n$  увеличиваются в  $m$  раз;

е) течение жидкости установившееся;

ж) при тушении пожара по повышенному номеру водозабор из сети НППВ на хозяйственно-питьевые нужды временно прекращается.

## 4.2 Расчет водоотдачи тупиковой сети НППВ

С учетом допущений «а»–«ж» и на основе баланса давлений применительно к ТС получаем уравнения (обозначения на Рисунке А1):

$$p_n - (A_n + A_{01}) \left( \sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 = \rho g H_1; \quad (A6)$$

$$p_i = A_i Q_i^2 + \rho g (h_i - H_i), \quad i = 1, \dots, n; \quad (A7)$$

$$p_{i-1} - p_i = A_{i-1,i} \left( \sum_{j=i}^n Q_j \right)^2 + \rho g (H_i - H_{i-1}), \quad i = 2, \dots, n; \quad (A8)$$

где  $A_i = A_{г.к}$  — коэффициент сопротивления гидранта с колонкой;  $A_i = A_{г.к} \approx 5,1 \cdot 10^7$  кг/м<sup>7</sup>;  $h_i$  — высота патрубка колонки на  $i$ -м гидранте, м;  $H_i$  — высота залегания отвода в  $i$ -й гидрант, м (высоты отсчитываются от уровня насоса).



При допущении, что коэффициенты  $A_1 = A_2 = \dots = A_n$  соответствуют коэффициенту сопротивления гидранта с колонкой  $A_{г.к} \approx 5,1 \cdot 10^7 \text{ кг/м}^7$ , система уравнений (A12)–(A13) имеет аналитическое решение, которое можно представить в рекуррентном виде:

$$Q_1 = \left( \frac{p_n}{A_{г.к} + (A_n + A_{01})B_1^2} \right)^{0,5}; \quad (A14)$$

$$Q_{i+1} = Q_i(B_i - 1)/B_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n-1; \quad (A15)$$

$$B_i = 1 + \frac{B_{i+1}}{(1 + B_{i+1}^2 A_{i,i+1} / A_{г.к})^{0,5}}, \quad i = 1, \dots, n-1; \quad B_n = 1, \quad (A16)$$

где  $\{B\}$  – условные безразмерные коэффициенты.

Решение системы уравнений (A14)–(A16) осуществляется в следующем порядке. Сначала по выражению (A16) вычисляются коэффициенты  $\{B_i\}$ , начиная с  $B_{n-1}$  до  $B_1$ . Далее по выражению (A14) рассчитывается расход  $Q_1$  гидранта, ближайшего к насосной станции, а затем по выражению (A15) — остальные расходы, начиная с  $Q_2$  до  $Q_n$ . Конкретные выражения для различного числа ПГ  $n$  приведены в Таблице A1.

Таблица A1 – Выражения для расчета величин расходов из гидрантов ТС

$N$	$\{B_i\}$	$\{Q_i\}$
1	$B_2 = 1; B_1 = 1 + (1 + A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$
2	$B_3 = 1; B_2 = 1 + (1 + A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_1 = 1 + B_2(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_3 = Q_2(1 + A_{23}/A_{г.к})^{-0,5}$
3	$B_4 = 1; B_3 = 1 + (1 + A_{34}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_2 = 1 + B_3(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_1 = 1 + B_2(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_3 = Q_2(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_4 = Q_3(1 + A_{34}/A_{г.к})^{-0,5}$
4	$B_5 = 1; B_4 = 1 + (1 + A_{45}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_3 = 1 + B_4(1 + B_4^2 A_{34}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_2 = 1 + B_3(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $B_1 = 1 + B_2(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5}$	$Q_2 = Q_1(1 + B_2^2 A_{12}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_3 = Q_2(1 + B_3^2 A_{23}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_4 = Q_3(1 + B_4^2 A_{34}/A_{г.к})^{-0,5};$ $Q_5 = Q_4(1 + A_{45}/A_{г.к})^{-0,5}$

Примечание. Расход  $Q_1$  находится по выражению (A14).

### 4.3 Расчет водоотдачи кольцевой сети НППВ

На основе выражений (А1)-(А5) составляется система нелинейных (квадратичных) алгебраических уравнений, решение которых численными методами позволяет определить расходы  $\{Q_j\}$  из задействованных ПГ сети НППВ. Искомая водоотдача КС НППВ определяется как сумма расходов из  $n$  задействованных ПГ:

$$Q_K = \sum_{j=1}^n Q_j \cdot \quad (A17)$$

Таблица А2 – Уравнения для моделирования водоотдачи КС НППВ при задействовании нескольких ПГ

Схема	Исходные уравнения	Выражения для расчётов
Рис. А2а	$p_0 = p_{н1} - A_{н1} q_{01}^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} + q_{21})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2} q_{21}^2 + \rho g(h_{н2} - h_2)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_2 - p_1 = A_{21} q_{21}^2 + \rho g(h_1 - h_2)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{п1}(q_{01} + q_{21})^2 + (A_{н1} + A_{01})q_{01}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г1}) = A_{п1}(q_{01} + q_{21})^2 + (A_{н2} + A_{21})q_{21}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{21} > 0; Q_K = Q_1$
Рис. А2б	$p_0 = p_{н1} - A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} + q_{31})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = A_{п2}(q_{02} + q_{32})^2 + \rho g(h_{г2} - h_2)$ $p_3 = p_{н2} - A_{н2}(q_{31} + q_{32})^2 + \rho g(h_2 - h_3)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_3 - p_1 = A_{31} q_{31}^2 + \rho g(h_1 - h_3)$ $p_3 - p_2 = A_{32} q_{32}^2 + \rho g(h_2 - h_3)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{31})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г2}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п2}(q_{02} + q_{32})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г1}) = A_{н2}(q_{31} + q_{32})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{31})^2 + A_{31} q_{31}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г2}) = A_{н2}(q_{31} + q_{32})^2 + A_{п2}(q_{02} + q_{32})^2 + A_{32} q_{32}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{31} > 0; Q_2 = q_{02} + q_{32} > 0;$ $Q_K = Q_1 + Q_2$
Рис. А2в	$p_0 = p_{н1} - A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} + q_{41})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{г2} - h_2)$ $p_3 = A_{п3}(q_{23} + q_{43})^2 + \rho g(h_{г3} - h_3)$ $p_4 = p_{н2} - A_{н2}(q_{41} + q_{43})^2 + \rho g(h_{н2} - h_4)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_4 - p_1 = A_{41} q_{41}^2 + \rho g(h_1 - h_4)$ $p_4 - p_3 = A_{43} q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{41})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г2}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г1}) = A_{н2}(q_{41} + q_{43})^2 + A_{п1}(q_{01} + q_{41})^2 + A_{41} q_{41}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г3}) = A_{н2}(q_{41} + q_{43})^2 + A_{п3}(q_{23} + q_{43})^2 + A_{43} q_{43}^2$ $\rho g(h_{г2} - h_{г3}) = A_{п3}(q_{23} + q_{43})^2 - A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{41} > 0; Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0;$ $Q_3 = q_{43} + q_{23} > 0; Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. А2г	$p_0 = p_{н1} - A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{п1}(q_{01} - q_{14})^2 + \rho g(h_{г1} - h_1)$ $p_2 = A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{г2} - h_2)$ $p_3 = A_{п3}(q_{23} + q_{53})^2 + \rho g(h_{г3} - h_3)$ $p_4 = A_{п4}(q_{14} + q_{54})^2 + \rho g(h_{г4} - h_4)$ $p_5 = p_{н2} - A_{н2}(q_{54} + q_{53})^2 + \rho g(h_{н2} - h_5)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г1}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{г2}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г3}) = A_{н2}(q_{54} + q_{53})^2 + A_{п3}(q_{23} + q_{53})^2 + A_{53} q_{53}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{г4}) = A_{н2}(q_{54} + q_{53})^2 + A_{п4}(q_{14} + q_{54})^2 + A_{54} q_{54}^2$ $\rho g(h_{г1} - h_{г4}) = A_{п4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{п1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{14} q_{14}^2$ $\rho g(h_{г2} - h_{г3}) = A_{п3}(q_{23} + q_{53})^2 - A_{п2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$

	$p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_1 - p_4 = A_{14} q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1)$ $p_5 - p_4 = A_{54} q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5)$ $p_5 - p_3 = A_{53} q_{53}^2 + \rho g(h_3 - h_5)$	$Q_1 = q_{01} - q_{14} > 0; Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0;$ $Q_3 = q_{23} + q_{53} > 0; Q_4 = q_{14} + q_{54} > 0;$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис. А2Д	$p_0 = p_{н1} - A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{н1} - h_0)$ $p_1 = A_{н1}(q_{01} - q_{14})^2 + \rho g(h_{н1} - h_1)$ $p_2 = A_{н2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{н2} - h_2)$ $p_3 = A_{н3}(q_{63} + q_{23})^2 + \rho g(h_{н3} - h_3)$ $p_4 = A_{н4}(q_{14} + q_{54})^2 + \rho g(h_{н4} - h_4)$ $p_5 = A_{н5}(q_{65} - q_{54})^2 + \rho g(h_{н5} - h_5)$ $p_6 = p_{н2} - A_{н2}(q_{65} + q_{63})^2 + \rho g(h_{н2} - h_6)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_1 - p_4 = A_{14} q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1)$ $p_5 - p_4 = A_{54} q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5)$ $p_6 - p_3 = A_{63} q_{63}^2 + \rho g(h_3 - h_6)$ $p_6 - p_5 = A_{65} q_{65}^2 + \rho g(h_5 - h_6)$	$p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{н1}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{н1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{н1} + \rho g(h_{н1} - h_{н2}) = A_{н1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{н2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{н3}) = A_{н2}(q_{65} + q_{63})^2 + A_{н3}(q_{63} + q_{23})^2 + A_{63} q_{63}^2$ $p_{н2} + \rho g(h_{н2} - h_{н5}) = A_{н2}(q_{65} + q_{63})^2 + A_{н5}(q_{65} - q_{54})^2 + A_{65} q_{65}^2$ $\rho g(h_{н1} - h_{н4}) = A_{н4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{н1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{14} q_{14}^2$ $\rho g(h_{н2} - h_{н3}) = A_{н3}(q_{23} + q_{63})^2 - A_{н2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $\rho g(h_{н5} - h_{н4}) = A_{н4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{н5}(q_{65} - q_{54})^2 + A_{54} q_{54}^2$ $Q_1 = q_{01} - q_{14} > 0; Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0;$ $Q_3 = q_{23} + q_{63} > 0; Q_4 = q_{14} + q_{54} > 0;$ $Q_5 = q_{65} - q_{54} > 0;$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$

#### 4.4 Оценка живучести сетей НППВ при повреждениях участков трубопроводов

При повреждающем воздействии на сеть НППВ факторов ЧС (землетрясения, взрывы технологических установок на предприятиях, повреждения при земляных работах и др.) повреждённые участки трубопроводов отсекаются задвижками, что позволяет обеспечить живучесть сети НППВ до проведения на ней ремонтных работ. В случае пожара некоторые ПГ такой сети могут обеспечивать водоотдачу, а некоторые – нет, что может быть учтено через коэффициент живучести  $K_{ж}$  как отношение числа задействованных ПГ, обеспечивающих водоотдачу  $N_B$ , к общему числу задействованных ПГ  $N_0$ :

$$K_{ж} = N_B / N_0. \quad (A18)$$

Для примера на Рисунках А3-А5 показаны гидравлические схемы кольцевой сети НППВ с двумя, тремя и четырьмя задействованными ПГ соответственно при повреждениях одного и двух трубопроводов. В Таблице А3 приведены результаты

моделирования водоотдачи кольцевой сети НППВ без повреждений и с повреждениями, а также, для сравнения, значения водоотдачи по справочнику РТП при внутреннем диаметре труб  $d=150$  мм и напоре  $H=10-80$  м.вод.ст. Порядок расчетов и значения коэффициентов сопротивления  $\{A\}$  для различных вариантов расположения насосных станций, ПГ и расстояний между ними приведены в разделе 4.1.

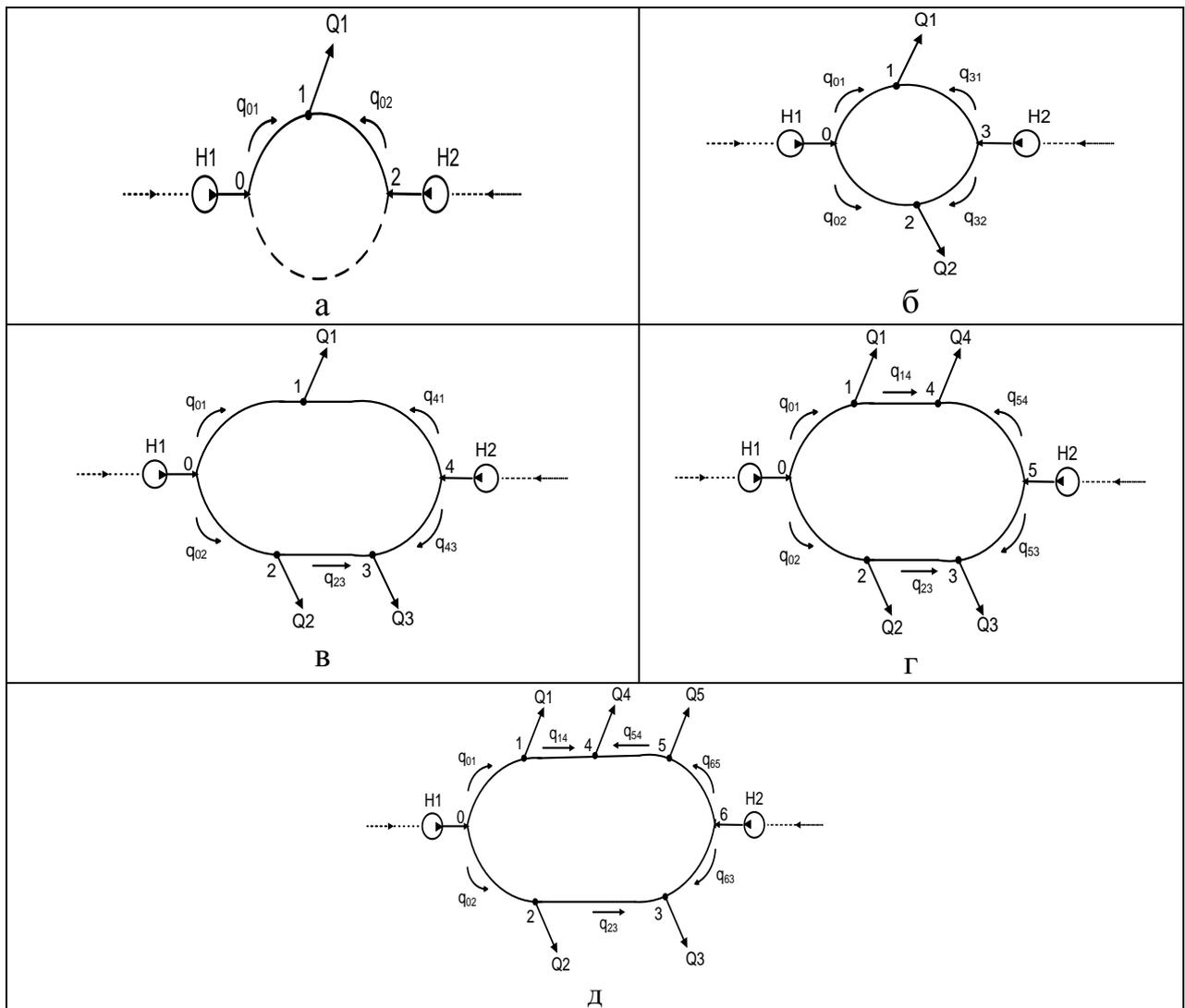


Рисунок А2 – Гидравлические модели КС НППВ задействования ПГ от 1 до 5 (а – один ПГ, б – 2 ПГ, в – 3 ПГ, г – 4 ПГ, д – 5 ПГ)

Как следует из анализа результатов моделирования (Таблица А3), КС НППВ при различных вариантах повреждений участков

трубопроводов, количестве и порядке задействованных ПГ обладает достаточной живучестью и в большинстве случаев обеспечивает требуемую водоотдачу. В частности, для схем на Рисунках А5д и А5з  $K_{\text{Ж}} = 0,667$ ; для схемы на Рисунке А6г  $K_{\text{Ж}} = 0,75$ . Для остальных случаев  $K_{\text{Ж}} = 1$ .

Общепринятые таблицы (Таблица А4) в справочниках РТП дают завышенную оценку водоотдачи, тогда как приведённый подход позволяет дать объективную оценку и может использоваться при составлении планов тушения пожаров и паспортов сетей НППВ.

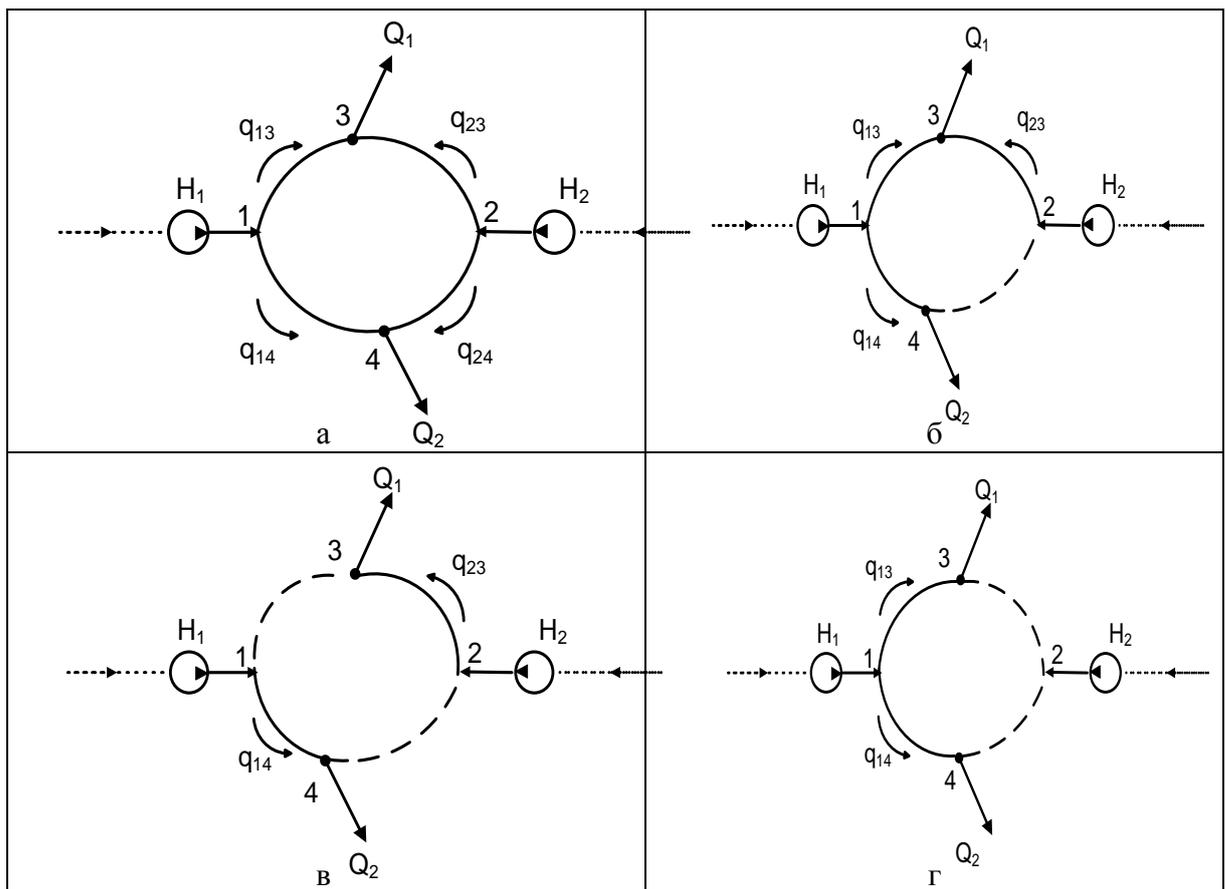


Рисунок А3 – Модели КС НППВ с двумя задействованными ПГ ( $n=2$ )

а – нормальный режим; б – повреждение одного участка; в, г – повреждение двух участков

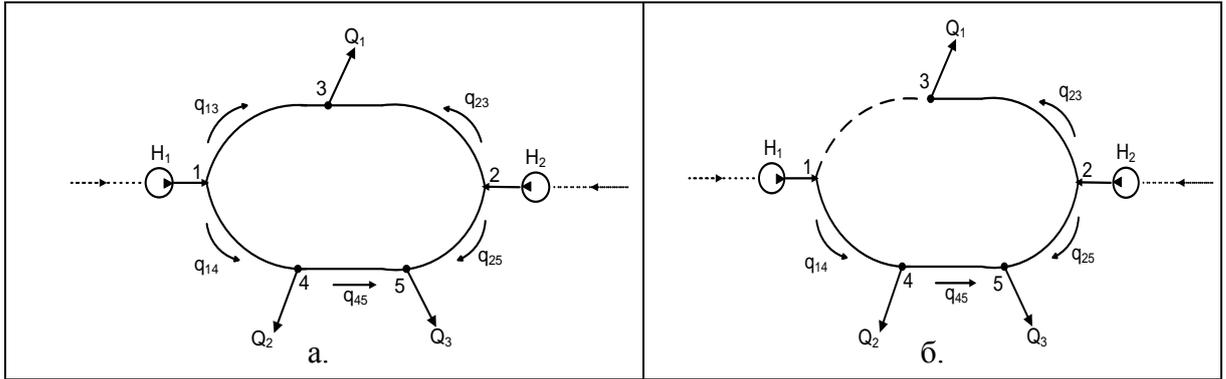
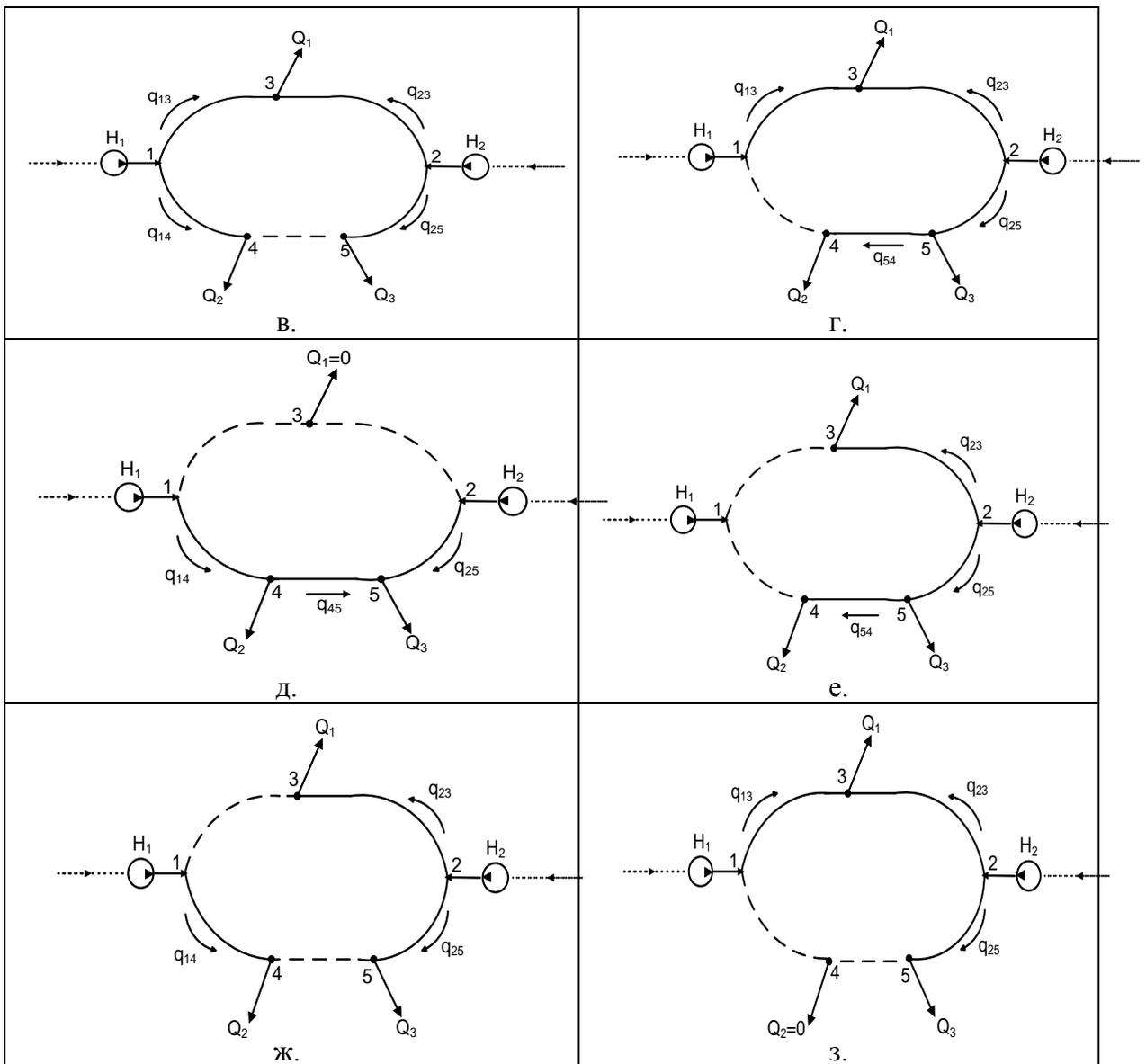


Рисунок А4 – Модели кольцевой сети с тремя задействованными ПГ ( $N=3$ ) а – нормальный режим; б – повреждение одного участка;



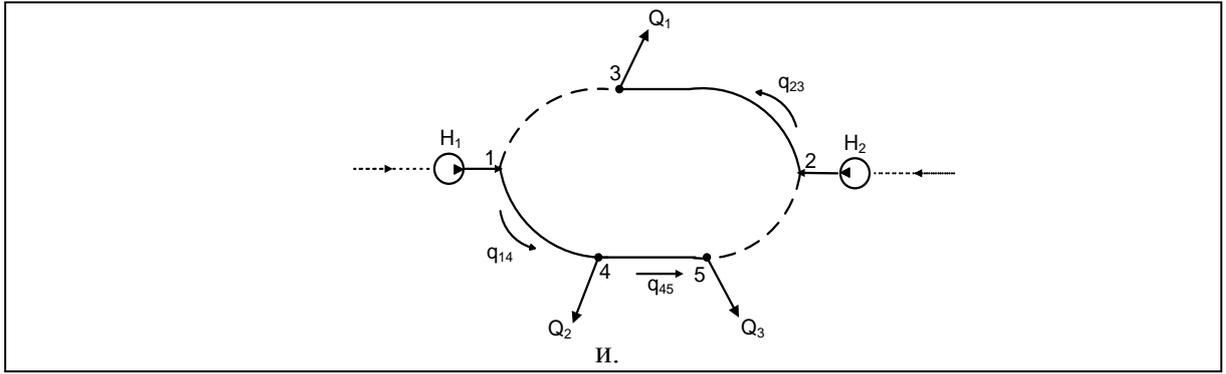
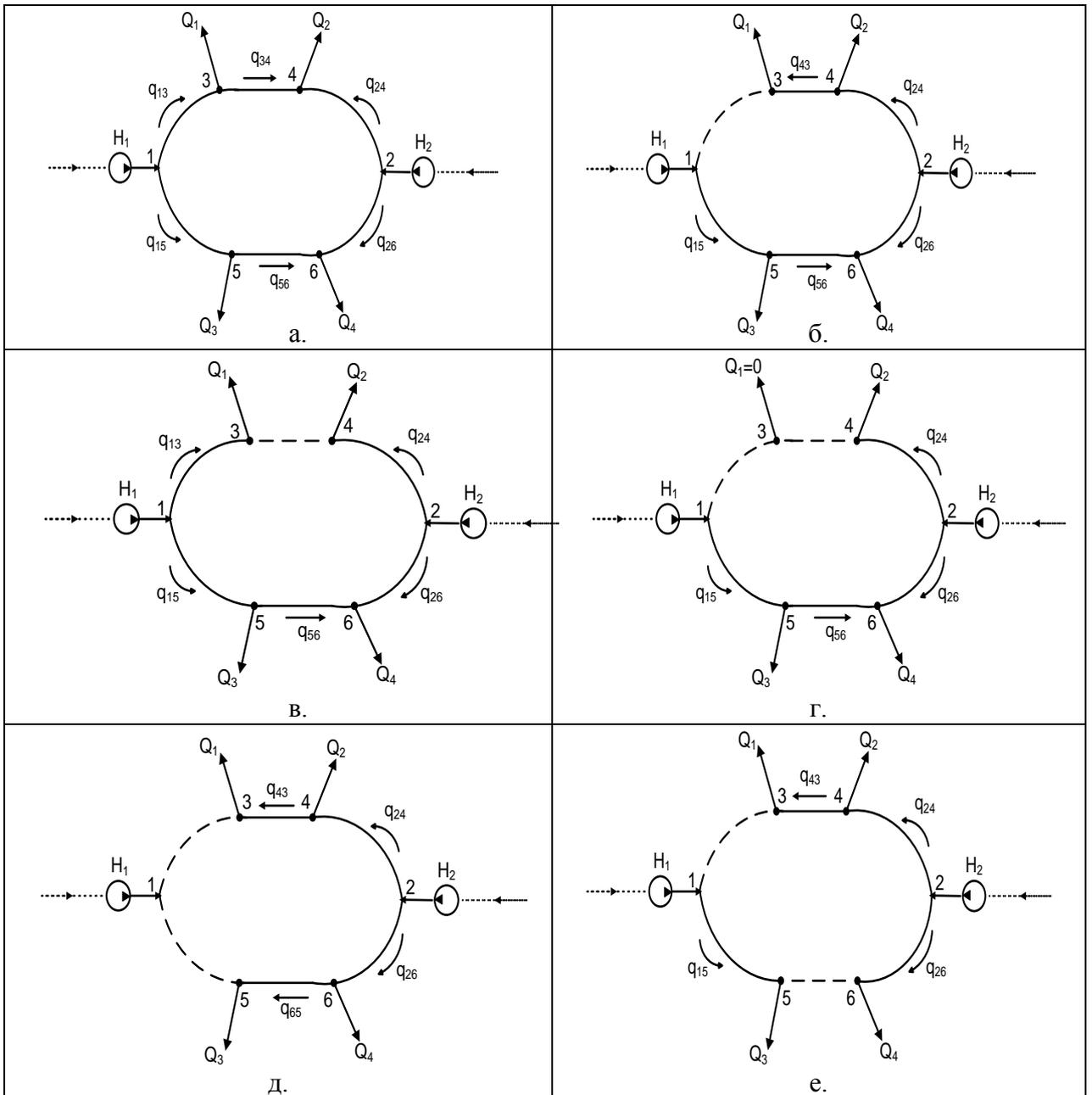


Рисунок А5 – Модели кольцевой сети с тремя задействованными ПГ ( $N=3$ ):  
в-г – повреждение одного участка; д-и – повреждение двух участков



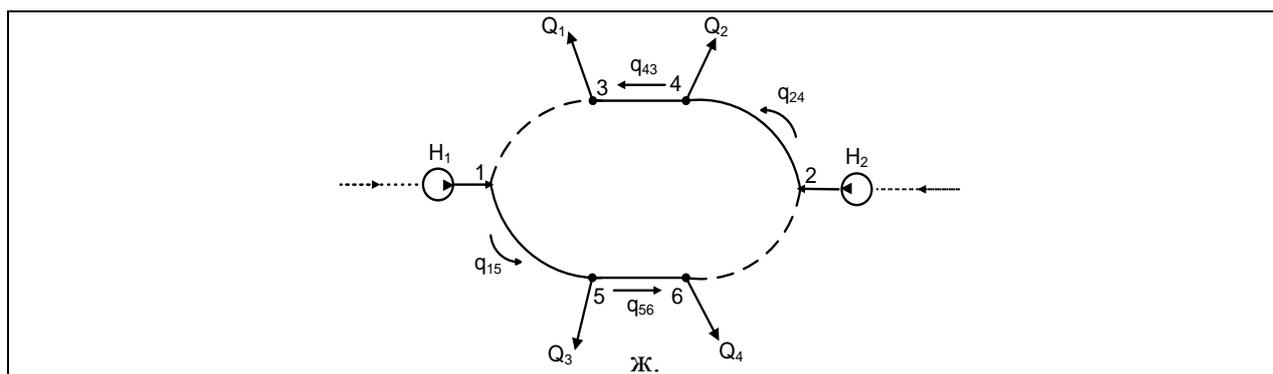


Рисунок А6 – Модели КС НППВ с четырьмя задействованными ПГ ( $N=4$ ) по схеме «2+2»: а – нормальный режим; б, в – повреждение одного участка; г–ж – повреждение двух участков

Таблица А3 – Результаты моделирования водоотдачи КС НППВ с учетом её повреждений

Количество задействованных ПГ	Водоотдача сети $Q_k$ , л/с, при диаметре трубы $d = 150$ мм и заданном напоре $H$ , м.вод.ст.								Схема задействования ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
$N = 1$	<b>28</b>	<b>39</b>	<b>48</b>	<b>55</b>	<b>62</b>	<b>68</b>	<b>73</b>	<b>78</b>	Рис. А2а
$N = 2$	11	16	20	23	25	28	30	58	Рис. А3а
	25	36	44	51	57	62	67	56	
	<b>36</b>	<b>42</b>	<b>64</b>	<b>74</b>	<b>82</b>	<b>90</b>	<b>97</b>	<b>114</b>	
	1	1	1	1	1	2	2	2	Рис. А3б
	23	32	39	45	50	55	59	63	
	<b>24</b>	<b>33</b>	<b>40</b>	<b>46</b>	<b>51</b>	<b>57</b>	<b>61</b>	<b>65</b>	
	11	16	20	23	25	28	30	32	Рис. А3в
	21	29	36	42	46	51	55	59	
<b>32</b>	<b>45</b>	<b>56</b>	<b>65</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>85</b>	<b>91</b>		
5	7	9	11	12	13	14	15	Рис. А3г	
21	29	36	42	46	51	55	59		
<b>26</b>	<b>36</b>	<b>45</b>	<b>53</b>	<b>58</b>	<b>64</b>	<b>69</b>	<b>74</b>		
$N = 3$	13	18	23	26	29	32	34	37	Рис. А4а
	13	19	23	26	30	32	35	37	
	17	24	29	33	37	41	44	47	
	<b>43</b>	<b>61</b>	<b>75</b>	<b>85</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	Рис. А4б
	9	12	15	17	19	21	23	24	
	16	22	27	31	35	38	41	44	
	17	24	29	33	37	41	44	47	Рис. А5в
	<b>42</b>	<b>58</b>	<b>71</b>	<b>81</b>	<b>91</b>	<b>100</b>	<b>108</b>	<b>115</b>	
	11	16	20	23	26	28	30	32	
	14	20	25	29	32	35	38	41	
	17	24	30	34	38	42	45	48	
	<b>42</b>	<b>60</b>	<b>75</b>	<b>86</b>	<b>96</b>	<b>105</b>	<b>113</b>	<b>121</b>	Рис. А5д
	5	7	8	9	11	12	13	14	
	7	11	13	15	17	19	20	22	
	25	36	44	50	56	62	67	71	Рис. А5г
	<b>37</b>	<b>54</b>	<b>65</b>	<b>74</b>	<b>84</b>	<b>93</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	
0	0	0	0	0	0	0	0	Рис. А5д	
17	24	30	35	39	42	46	49		
18	25	31	36	40	44	47	50		
<b>35</b>	<b>49</b>	<b>61</b>	<b>71</b>	<b>79</b>	<b>86</b>	<b>93</b>	<b>99</b>		

## Продолжение Таблицы А3

N = 3	4	6	8	9	10	11	12	13	Рис. А5е
	7	10	12	14	16	17	18	20	
	8	12	14	17	19	20	22	24	
	<b>19</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>48</b>	<b>52</b>	<b>57</b>	Рис. А5,ж
	8	12	15	17	19	21	22	24	
	11	16	19	22	25	27	29	31	
	21	29	36	42	46	51	55	59	Рис. А5з
	<b>40</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>90</b>	<b>99</b>	<b>106</b>	<b>114</b>	
0	0	0	0	0	0	0	0		
12	17	21	24	27	30	32	34	Рис. А5и	
25	36	44	51	56	62	67	71		
<b>37</b>	<b>53</b>	<b>65</b>	<b>75</b>	<b>83</b>	<b>92</b>	<b>99</b>	<b>105</b>		
9	12	15	17	20	21	23	25	Рис. А6а	
11	16	20	23	25	28	30	32		
14	19	24	27	30	33	36	38		
<b>34</b>	<b>47</b>	<b>59</b>	<b>67</b>	<b>75</b>	<b>82</b>	<b>89</b>	<b>95</b>	Рис. А6б	
10	15	18	21	24	26	28	29		
10	15	19	22	24	26	28	30		
12	16	20	23	26	28	30	32	Рис. А6в	
12	16	20	23	26	28	30	32		
<b>44</b>	<b>62</b>	<b>77</b>	<b>89</b>	<b>100</b>	<b>108</b>	<b>116</b>	<b>123</b>		
3	5	6	7	8	9	9	10	Рис. А6г	
5	7	9	11	12	13	14	15		
15	22	27	31	35	38	41	44		
16	23	28	32	36	40	43	46	Рис. А6д	
<b>39</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>91</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>115</b>		
8	12	15	17	19	21	22	24		
11	16	20	23	26	28	31	33	Рис. А6е	
11	16	20	23	26	28	31	33		
12	17	21	24	27	29	32	34		
<b>42</b>	<b>61</b>	<b>76</b>	<b>87</b>	<b>98</b>	<b>106</b>	<b>116</b>	<b>124</b>	Рис. А6ж	
0	0	0	0	0	0	0	0		
8	12	15	17	19	21	23	25		
15	22	27	31	35	39	41	44	Рис. А6з	
16	23	28	32	36	40	43	46		
<b>39</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>115</b>		
3	5	6	7	7	8	9	10	Рис. А6и	
5	7	8	10	11	12	13	14		
5	7	9	10	12	13	14	15		
6	9	11	13	14	16	17	18	Рис. А6к	
<b>19</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>49</b>	<b>53</b>	<b>57</b>		
3	5	6	7	8	8	9	10		
5	7	9	11	12	13	14	15	Рис. А6л	
11	16	19	22	24	27	29	31		
21	29	36	41	46	51	55	58		
<b>40</b>	<b>57</b>	<b>70</b>	<b>81</b>	<b>90</b>	<b>99</b>	<b>107</b>	<b>114</b>	По справочнику РТП	
<b>55</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>95</b>	<b>105</b>	<b>110</b>	<b>130</b>	<b>140</b>		

## Приложение Б

**Вид окна программы математического пакета *Mathcad* для расчета водоотдачи сети наружного противопожарного водоснабжения**

$$\begin{array}{lll}
 q_{01} := 0.01 & d := 0.15 & \lambda := 0.11 \cdot \left[ \left( \frac{1}{d} \right) \div 1000 \right]^{0.25} \\
 q_{02} := 0.01 & \rho_1 := 1000 & \\
 q_{23} := 0.01 & L_{01} := 105 & \xi_{п01} := \frac{\lambda \cdot L_{01}}{d} \\
 q_{41} := 0.01 & L_{02} := 105 & \xi_{п02} := \frac{\lambda \cdot L_{02}}{d} \\
 q_{54} := 0.01 & L_{23} := 201 & \xi_{п23} := \frac{\lambda \cdot L_{23}}{d} \\
 q_{53} := 0.01 & L_{41} := 96 & \xi_{п41} := \frac{\lambda \cdot L_{41}}{d} \\
 A_{н1} := 1.44 \cdot 10^8 & L_{54} := 1619 & \xi_{п54} := \frac{\lambda \cdot L_{54}}{d} \\
 A_{н2} := 1.44 \cdot 10^8 & L_{53} := 925 & \xi_{п53} := \frac{\lambda \cdot L_{53}}{d} \\
 P_{н1} := 1 \cdot 10^5 & \xi_m := 1.2 & \\
 P_{н2} := 1 \cdot 10^5 & K_э := 1 & \\
 A_{пг} := 5.1 \cdot 10^7 & & \\
 F_1 := \pi d^2 \div 4 & & 
 \end{array}$$

Given

$$P_{н1} - A_{н1} \cdot (q_{01} + q_{02})^2 - A_{пг} \cdot (q_{01} + q_{41})^2 - A_{01} \cdot q_{01}^2 = 0$$

$$A_{пг} \cdot (q_{54} - q_{41})^2 - A_{пг} \cdot (q_{01} + q_{41})^2 - A_{41} \cdot q_{41}^2 = 0$$

$$P_{н2} - A_{н2} \cdot (q_{54} + q_{53})^2 - A_{пг} \cdot (q_{54} - q_{41})^2 - A_{54} \cdot q_{54}^2 = 0$$

$$P_{н2} - A_{н2} \cdot (q_{54} + q_{53})^2 - A_{пг} \cdot (q_{23} + q_{53})^2 - A_{53} \cdot q_{53}^2 = 0$$

$$A_{пг} \cdot (q_{02} - q_{23})^2 - A_{пг} \cdot (q_{23} + q_{53})^2 - A_{23} \cdot q_{23}^2 = 0$$

+

$$P_{н1} - A_{н1} \cdot (q_{01} + q_{02})^2 - A_{пг} \cdot (q_{02} - q_{23})^2 - A_{02} \cdot q_{02}^2 = 0$$

Find(q<sub>01</sub>, q<sub>02</sub>, q<sub>23</sub>, q<sub>41</sub>, q<sub>54</sub>, q<sub>53</sub>, q<sub>01</sub> + q<sub>41</sub>, q<sub>02</sub> - q<sub>23</sub>, q<sub>23</sub> + q<sub>53</sub>, q<sub>54</sub> - q<sub>41</sub>) =

	0
0	0.0128950
1	0.0118388
2	0.0003772
3	-0.0022961
4	0.0084680
5	0.0110759
6	0.0105989
7	0.0114616
8	0.0114531
9	0.0107641

## Приложение В

### Акты внедрения результатов исследования

УТВЕРЖДАЮ  
 Начальник ФГКУ «СПСЧ ФПС  
 по Новосибирской области»  
 подполковник внутренней службы  
 Е.В. Кабринюк  
 \_\_\_\_\_ 2017 г.



АКТ

**об использовании результатов диссертационного исследования  
 Пивоварова Н.Ю. на тему «Модели и методы оценки достаточности  
 водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях  
 нефтехимической промышленности» по специальности 05.26.03 -  
 пожарная и промышленная безопасность  
 (нефтегазовая отрасль)**

Комиссия в составе –

*Председателя:*

Заместителя начальника ФГКУ «СПСЧ ФПС по Новосибирской области» подполковника внутренней службы Фомина Дениса Андреевича;

*Членов комиссии:*

Заместителя начальника части (по ПАСР) – начальника службы тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ ФГКУ «СПСЧ ФПС по Новосибирской области» майора внутренней службы Новикова Дениса Сергеевича;

Начальника службы радиационной и химической защиты ФГКУ «СПСЧ ФПС по Новосибирской области» капитана внутренней службы Пушкарева Антона Сергеевича

настоящим подтверждает, что результаты диссертационного исследования Пивоварова Николая Юрьевича учтены и используются в практической деятельности ФГКУ «СПСЧ ФПС по Новосибирской области».

Результатами диссертационного исследования являются:

1. Расчетные модели тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения предприятий нефтехимической промышленности;
2. Методы оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности;

3. Метод оценки живучести сетей наружного противопожарного водоснабжения при повреждениях участков трубопроводов на предприятиях нефтехимической промышленности;

Данные результаты используются в ФГКУ «СПСЧ ФПС по Новосибирской области» при составлении документов оперативного планирования и разработке методических планов для проведения пожарно-тактических учений на предприятия нефтехимической промышленности в районе выезда подразделений ФПС гарнизона пожарной охраны г. Новосибирска для проведения анализа достаточности водоснабжения при ликвидации на них крупных пожаров.

Применение данных результатов позволило повысить объективность прогнозирования достаточности водоснабжения для ликвидации крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности на территории гарнизона пожарной охраны г. Новосибирска.

Председатель комиссии:

Заместитель начальника ФГКУ

«СПСЧ ФПС по Новосибирской области»

подполковник внутренней службы



Д.А. Фомин

Члены комиссии:

Заместитель начальника части (по ПАСР) –

начальник службы ТПиПАСР ФГКУ

«СПСЧ ФПС по Новосибирской области»

майор внутренней службы

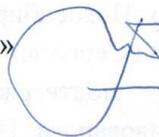


Д.С. Новиков

Начальник службы РИХЗ ФГКУ

«СПСЧ ФПС по Новосибирской области»

капитан внутренней службы



А.С.Пушкарев

« 14 » Мая 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
 «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
 (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по безопасности  
 ФГАОУ ВО «СПбПУ»

А.В. Изанов

« 03 » 09 2017 год

АКТ

**об использовании результатов диссертационного исследования Пивоварова Н.Ю.  
 на тему: «Модели и методы оценки достаточности водоснабжения при тушении  
 крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности» по  
 специальности 05.26.03 - пожарная и промышленная безопасность  
 (нефтегазовая отрасль)**

Комиссия в составе: председателя комиссии – начальника Управления гражданской безопасности ФГАОУ ВО «СПбПУ» Савошинского Олега Петровича и членов комиссии: начальника отдела пожарной профилактики Управления гражданской безопасности ФГАОУ ВО «СПбПУ» Шишкова Максима Леонидовича и ведущего инженера отдела пожарной профилактики Управления гражданской безопасности ФГАОУ ВО «СПбПУ» – Филипповой Анастасии Анатольевны, настоящим подтверждает, что результаты диссертационного исследования Пивоварова Николая Юрьевича на тему: «Модели и методы оценки достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности» использованы студентами Института военно-технического образования и безопасности ФГАОУ ВО «СПбПУ», входящими в состав учебно-пожарной добровольной команды «Политехник» и студенческого спасательного отряда Петра Великого, созданных при Управлении гражданской безопасности ФГАОУ ВО «СПбПУ», при разработке (составлении) в ознакомительном порядке документов предварительного планирования действий по тушению пожаров (планов тушения пожаров и карточек тушения пожаров) зданий (корпусов) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Применение данных результатов позволяет повысить объективность прогнозирования достаточности водоснабжения для тушения (ликвидации) пожаров.

Председатель комиссии:

начальник Управления гражданской безопасности

ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Члены комиссии:

начальник отдела пожарной профилактики

Управления гражданской безопасности ФГАОУ ВО «СПбПУ»

ведущий инженер отдела пожарной профилактики

Управления гражданской безопасности ФГАОУ ВО «СПбПУ»

О.П. Савошинский  
 М.И. Шишков  
 А.А. Филиппова

« 02 » 09 2017 г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Санкт-Петербургского  
университета ГПС МЧС России по научной работе  
доктор политических наук

Т.В. Мусиенко

« 11 » 09 2017 г.

## АКТ

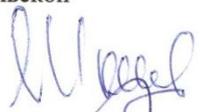
**об использовании результатов диссертационного исследования  
Пивоварова Н.Ю. на тему «Модели и методы оценки достаточности  
водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях  
нефтехимической промышленности» по специальности 05.26.03 -  
пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)**

Комиссия в составе: начальника Центра организации научно-исследовательской и редакционной деятельности университета кандидата педагогических наук, доцента Мамедова Назима Магомедовича (председатель), начальника отдела планирования, организации и координации научных исследований кандидата технических наук Турсенева Сергея Александровича и старшего преподавателя кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Марухина Петра Николаевича (члены комиссии) настоящим подтверждает, что результаты диссертационного исследования Пивоварова Николая Юрьевича – расчётные модели тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения предприятий нефтехимической промышленности и методы оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности использованы при подготовке проекта нормативного документа «Методические рекомендации по оценке водоотдачи сетей наружного противопожарного водоснабжения» и подготовки соответствующего приложения в СП 8.13130.2009 СППЗ. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности.

Применение указанных результатов диссертационного исследования позволяет повысить объективность оценки достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров как на предприятиях нефтехимической промышленности, так и на других важных объектах.

Председатель комиссии:

Начальник Центра организации научно-исследовательской  
и редакционной деятельности университета  
кандидат педагогических наук, доцент



Н.М. Мамедов

Члены комиссии:

начальник отдела планирования, организации и  
координации научных исследований  
кандидат технических наук



С.А. Турсенев

старший преподаватель кафедры организации пожаротушения  
и проведения аварийно-спасательных работ



П.Н. Марухин

« 11 » 09 2017 г.

## УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Военного института  
(инженерно-технического) «Военной академии  
материально-технического обеспечения имени  
генерала армии А.В. Хрулёва» по учебной и  
научной работе

полковник

«12» 09

2017 г.

Р. Кашеев

## АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования  
Пивоварова Николая Юрьевича «Модели и методы оценки  
достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на  
предприятиях нефтехимической промышленности» по  
специальности 05.26.03 - пожарная и промышленная безопасность  
(нефтегазовая отрасль)

Комиссия в составе: заведующего кафедрой пожарной безопасности (№3), кандидата технических наук Потапенко Вячеслава Викторовича (председатель), доцента кафедры пожарной безопасности (№3), кандидата юридических наук, доцента Кондратьева Сергея Александровича, преподавателя кафедры (№3), кандидата технических наук Пименовой Марины Александровны (члены комиссии) настоящим подтверждают, что результаты диссертационного исследования Пивоварова Н.Ю.: метод оценки живучести сетей наружного противопожарного водоснабжения при повреждениях участков трубопроводов на предприятиях нефтехимической промышленности и методы оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности использованы в дисциплинах «Тактика тушения пожаров» и «Противопожарное водоснабжение», а также при формировании перечня дипломных работ в части расчёта сил и средств применительно к объектам, использующим легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, с учётом возможных дестабилизирующих воздействий при ЧС природного и искусственного характера.

Председатель комиссии:  
заведующий кафедрой №3  
кандидат технических наук



Потапенко В.В.

Члены комиссии:  
доцент кафедры №3  
кандидат юридических наук



Кондратьев С.А.

преподаватель кафедры №3  
кандидат технических наук



Пименова М.А.

«12» 09 2017 г.