

# **О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОЦЕНКЕ ВОДОУДАЧИ СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

**А.А. Таранцев, доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник высшей школы Российской Федерации;  
Н.Ю. Пивоваров;  
О.В. Петрова, кандидат технических наук, доцент.  
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Изложены методы объективной оценки водоудачи сетей наружного противопожарного водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Методы учитывают такие факторы, как характеристики трубопроводов и насосов, количество и взаиморасположение гидрантов, перепады высот на местности. Методы позволяют также оценить живучесть сетей при их повреждении в результате чрезвычайной ситуации. Предложен проект документа – методических рекомендаций по оценке водоудачи сетей наружного противопожарного водоснабжения, который может быть использован при составлении планов тушения пожаров на промышленных объектах.

*Ключевые слова:* методические рекомендации, наружный противопожарный водопровод, тушение крупных пожаров, моделирование водоудачи, пожарный гидрант, планирование

## **ON THE DEVELOPMENT OF GUIDELINES FOR THE ASSESSMENT FLUID LOSS NETWORK OUTDOOR FIRE WATER**

A.A. Tarantsev; N.Yu. Pivovarov; O.V. Petrova.  
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Methods of objective assessment of water return of networks of external fire-water supply to extinguish a major fire at the enterprises of oil refining and petrochemical industry. Methods consider such factors as characteristics of pipelines and pumps, quantity and interposition of hydrants, height differences on the area. Methods allow to estimate also survivability of networks at their damage to result of emergency situations. The draft document – methodical recommendations about assessment of water return of networks of external fire-water supply is offered that it can be used in case of creation of plans of suppression of the fires on industrial facilities.

*Keywords:* methodical recommendations, external fire-proof water supply system, suppression of major fire, water return modeling, fire hydrant, planning

Тушение пожаров различных классов [1] невозможно без использования основного огнетушащего вещества – воды, которая в большинстве случаев забирается из сетей наружного противопожарного водопровода (НППВ) [2, 3]. Для оценки необходимого расхода воды на тушение населённых пунктов, зданий, сооружений и других объектов разработан специальный свод правил – СП 8.13130.2009 [4]. Обеспечение пожарной безопасности на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности регламентировано Рекомендациями [5], в разделе 8.1.3 которых изложены требования по противопожарному водоснабжению.

Для обеспечения должного уровня пожарной безопасности в гарнизонах пожарной охраны имеются перечни наиболее важных объектов, в том числе предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, на которые необходимо разрабатывать планы тушения пожаров (ПТП) [6]. Одним из важнейших пунктов таких ПТП является оценка достаточности водоснабжения, которая для сетей НППВ, как правило, осуществляется с использованием таблиц из справочников руководителей тушения пожара (РТП) (табл.), например [7, 8].

Таблица. **Водоотдача тупиковых и кольцевых сетей НППВ**

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 сети;  
в правой части – кольцевой

Как показано в работах [9–12], в ходе тушения некоторых крупных пожаров, произошедших в результате аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, возникают ситуации, когда фактическая водоотдача сети НППВ недостаточна, хотя согласно таблице и ПТП 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 [13, 14] показано, что такая ситуация возможна из-за игнорирования ряда факторов, отрицательно влияющих на водоотдачу сети НППВ – количества и взаимного расположения задействуемых пожарных гидрантов (ПГ), рельефа местности, возможностей насосных станций и др.

Для решения проблемы объективной оценки водоотдачи тупиковых и кольцевых сетей НППВ (в том числе с учётом их повреждений) авторами данной статьи проведён комплекс исследований, базирующихся на основных положениях гидравлики [2] и соотношениях [15]. Наиболее важные результаты исследований опубликованы в работах [13, 14, 16]. Разработанные методы позволяют оценивать живучесть сетей НППВ при повреждениях их трубопроводов в результате природных или техногенных чрезвычайных ситуаций [16].

Таким образом, полученные результаты позволили (прежде всего, применительно к предприятиям нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности) предложить следующее:

- а) разработать проект документа – Методических рекомендаций по оценке водоотдачи сетей НППВ, текст которого прилагается в данной статье;
- б) составлять паспорта водоотдачи сетей НППВ при различных вариантах расстановки пожарных автомобилей на ПГ;
- в) в Методических рекомендациях по составлению планов и карточек тушения пожаров [6] на объекты предусмотреть специальный раздел по расчётной оценке достаточности водоснабжения, в том числе с использованием современных компьютерных технологий;

г) в СП 8.113130.2009 [4] и рекомендации [5] ввести специальное приложение, позволяющее объективно оценить водоотдачу сетей НППВ при различных параметрах сетей и вариантов задействования ПГ при тушении пожаров.

Проект

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ВОДООТДАЧИ  
СЕТЕЙ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

### **1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

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

1.2. МР устанавливают порядок оценки водоотдачи 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 справочный характер, их применение возможно как дополнение к существующему порядку оценки водоотдачи согласно таблицам в справочниках руководителя тушения пожара (РТП). МР могут использоваться при составлении планов тушения пожаров (ПТП) и паспортов сетей НППВ.

### **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. СП 8.13130.2009. Системы ППЗ. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности.

2.6. СП 155.13330.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности.

2.7. Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожаров (утв. МЧС России 1 марта 2013 г.): Письмо № 43-956-18. М., 2013.

2.8. Повзик Я.С. Справочник руководителя тушения пожара. М.: ЗАО «Спецтехника», 2004.

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

### **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 сети обеспечивать водоотдачу при повреждении одного или нескольких её участков.

**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, ПТП – план тушения пожара.

#### 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:

$$\Delta p = A Q^2, \quad (1)$$

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:

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

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

Коэффициент линейного сопротивления для круглых труб находится по выражению:

$$\xi_{li} = \frac{\lambda L}{d}, \quad (3)$$

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

$$\lambda \approx 0,11 \left( \frac{K_s}{d} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

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

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

$$p(Q) = p_n - A_n Q^2, \quad (5)$$

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

г) НС и линия представляют собой ТС или КС с  $n$  отводами (по числу задействованных ПГ);

д) при параллельном включении  $m$  однотипных насосов их общая НРХ также имеет вид (5), 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 (ТС) НППВ

С учетом допущений «а»–«ж» и на основе баланса давлений применительно к ТС (рис. 1) получаем уравнения (обозначения на рис. 1):

$$p_n - (A_n + A_{01}) \left( \sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 = \rho g H_1; \quad (6)$$

$$p_i = A_i Q_i^2 + \rho g (h_i - H_i), \quad i=1, \dots, n; \quad (7)$$

$$p_{i-1} - p_i = A_{i-1,i} \left( \sum_{j=i}^n Q_j \right)^2 + \rho g (H_i - H_{i-1}), \quad i=2, \dots, n; \quad (8)$$

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

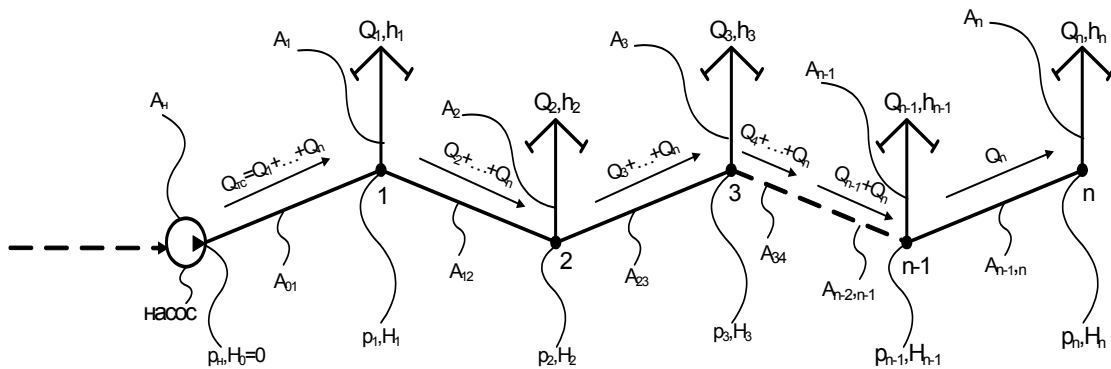


Рис. 1. Расчетная схема ТС НППВ с  $n$  задействованными ПГ

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 (6)–(8) приводятся к виду системы из  $n$  нелинейных алгебраических уравнений:

$$p_n - (A_n + A_{01}) \left( \sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 - A_1 Q_1^2 - \rho g h_1 = 0; \quad (9)$$

$$A_{i-1} Q_{i-1}^2 - A_i Q_i^2 + \rho g (h_i - h_{i-1}) - A_{i-1,i} \left( \sum_{j=i}^n Q_j \right)^2, \quad i=2, \dots, n. \quad (10)$$

Аналитическое решение уравнений (9) и (10) возможно только в частных случаях. Например, при задействовании только одного ПГ ( $n=1$ ) водоотдача  $Q_c = Q_1$  находится из выражения:

$$Q_1 = \left( \frac{p_n - \rho g h_1}{A_n + A_{01} + A_{г.к}} \right)^{0,5}. \quad (11)$$

Когда рельеф местности, где обустроена сеть НППВ, ровный и можно пренебречь перепадами высот, что характерно для многих населённых пунктов Российской Федерации, система уравнений (9) и (10) упрощается:

$$p_H - (A_H + A_{01}) \left( \sum_{i=1}^n Q_i \right)^2 - A_1 Q_1^2 = 0; \quad (12)$$

$$A_{i-1} Q_{i-1}^2 - A_i Q_i^2 - A_{i-1,i} \left( \sum_{j=i}^n Q_j \right)^2, \quad i=2, \dots, n. \quad (13)$$

При допущении, что коэффициенты  $A_1=A_2=\dots=A_n$  соответствуют коэффициенту сопротивления ПГ с колонкой  $A_{Г.К} \approx 5,1 \cdot 10^7$  кг/м<sup>7</sup>, система уравнений (12)–(13) имеет аналитическое решение, которое можно представить в рекуррентном виде:

$$Q_1 = \left( \frac{p_H}{A_{Г.К} + (A_H + A_{01}) B_1^2} \right)^{0,5}; \quad (14)$$

$$Q_{i+1} = Q_i (B_i - 1) / B_{i+1}, \quad i=1, \dots, n-1; \quad (15)$$

$$B_i = 1 + \frac{B_{i+1}}{(1 + B_{i+1}^2 A_{i,i+1} / A_{Г.К})^{0,5}}, \quad i=1, \dots, n-1; \quad B_n = 1, \quad (16)$$

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

Решение системы уравнений (14)–(16) осуществляется в следующем порядке. Сначала по выражению (16) вычисляются коэффициенты  $\{B_i\}$ , начиная с  $B_{n-1}$  до  $B_1$ . Далее по выражению (14) рассчитывается расход  $Q_1$  ПГ, ближайшего к насосной станции, а затем по выражению (15) – остальные расходы, начиная с  $Q_2$  до  $Q_n$ . Конкретные выражения для различного числа ПГ  $n$  приведены в табл. 1.

Таблица 1. 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 (14)

#### 4.3. Расчет водоотдачи кольцевой сети (КС) НППВ

На основе выражений (1–5) составляется система нелинейных (квадратичных) алгебраических уравнений (табл. 2), решение которых численными методами (например, с использованием Mathcad14 позволяет определить расходы  $\{Q_j\}$  из задействованных ПГ сети НППВ). Искомая водоотдача КС НППВ определяется как сумма расходов из  $n$  задействованных ПГ:

$$Q_K = \sum_{j=1}^n Q_j. \quad (17)$$

**Таблица 2. Уравнения для моделирования водоотдачи  
КС НППВ при задействовании нескольких ПП**

Рис.	Исходные уравнения	Выражения для расчётов
Рис. 2а	$p_0 = p_{h1} - A_{h1} q_{01}^2 + \rho g(h_{h1} - h_0)$ $p_1 = A_{nr}(q_{01} + q_{21})^2 + \rho g(h_r - h_1)$ $p_2 = p_{h2} - A_{h2} q_{21}^2 + \rho g(h_{h2} - h_2)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_2 - p_1 = A_{21} q_{21}^2 + \rho g(h_1 - h_2)$	$p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_r) = A_{nr}(q_{01} + q_{21})^2 + (A_{h1} + A_{01})q_{01}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_r) = A_{nr}(q_{01} + q_{21})^2 + (A_{h2} + A_{21})q_{21}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{21} > 0; Q_k = Q_1$
Рис. 2б	$p_0 = p_{h1} - A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{h1} - h_0)$ $p_1 = A_{nr1}(q_{01} + q_{31})^2 + \rho g(h_{r1} - h_1)$ $p_2 = A_{nr2}(q_{02} + q_{32})^2 + \rho g(h_{r2} - h_2)$ $p_3 = p_{h2} - A_{h2}(q_{31} + q_{32})^2 + \rho g(h_2 - h_3)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_3 - p_1 = A_{31} q_{31}^2 + \rho g(h_1 - h_3)$ $p_3 - p_2 = A_{32} q_{32}^2 + \rho g(h_2 - h_3)$	$p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r1}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr1}(q_{01} + q_{31})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r2}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr2}(q_{02} + q_{32})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r1}) = A_{h2}(q_{31} + q_{32})^2 + A_{nr1}(q_{01} + q_{31})^2 + A_{31} q_{31}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r2}) = A_{h2}(q_{31} + q_{32})^2 + A_{nr2}(q_{02} + q_{32})^2 + A_{32} q_{32}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{31} > 0; Q_2 = q_{02} + q_{32} > 0; Q_k = Q_1 + Q_2$
Рис. 2в	$p_0 = p_{h1} - A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{h1} - h_0)$ $p_1 = A_{nr1}(q_{01} + q_{41})^2 + \rho g(h_{r1} - h_1)$ $p_2 = A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{r2} - h_2)$ $p_3 = A_{nr3}(q_{23} + q_{43})^2 + \rho g(h_{r3} - h_3)$ $p_4 = p_{h2} - A_{h2}(q_{41} + q_{43})^2 + \rho g(h_{h2} - h_4)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_4 - p_1 = A_{41} q_{41}^2 + \rho g(h_1 - h_4)$ $p_4 - p_3 = A_{43} q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4)$	$p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r1}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr1}(q_{01} + q_{41})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r2}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r1}) = A_{h2}(q_{41} + q_{43})^2 + A_{nr1}(q_{01} + q_{41})^2 + A_{41} q_{41}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r3}) = A_{h2}(q_{41} + q_{43})^2 + A_{nr3}(q_{23} + q_{43})^2 + A_{43} q_{43}^2$ $\rho g(h_{r2} - h_{r3}) = A_{nr3}(q_{23} + q_{43})^2 - A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $Q_1 = q_{01} + q_{41} > 0; Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0;$ $Q_3 = q_{43} + q_{23} > 0; Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 2г	$p_0 = p_{h1} - A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{h1} - h_0)$ $p_1 = A_{nr1}(q_{01} - q_{14})^2 + \rho g(h_{r1} - h_1)$ $p_2 = A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{r2} - h_2)$ $p_3 = A_{nr3}(q_{23} + q_{53})^2 + \rho g(h_{r3} - h_3)$ $p_4 = A_{nr4}(q_{14} + q_{54})^2 + \rho g(h_{r4} - h_4)$ $p_5 = p_{h2} - A_{h2}(q_{54} + q_{53})^2 + \rho g(h_{h2} - h_5)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_1 - p_4 = A_{14} q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1)$ $p_5 - p_4 = A_{54} q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5)$ $p_5 - p_3 = A_{53} q_{53}^2 + \rho g(h_3 - h_5)$	$p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r1}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r2}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r3}) = A_{h2}(q_{54} + q_{53})^2 + A_{nr3}(q_{23} + q_{53})^2 + A_{53} q_{53}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r4}) = A_{h2}(q_{54} + q_{53})^2 + A_{nr4}(q_{14} + q_{54})^2 + A_{54} q_{54}^2$ $\rho g(h_{r1} - h_{r4}) = A_{nr4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{nr1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{14} q_{14}^2$ $\rho g(h_{r2} - h_{r3}) = A_{nr3}(q_{23} + q_{53})^2 - A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $Q_1 = q_{01} - q_{14} > 0; Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0;$ $Q_3 = q_{23} + q_{53} > 0; Q_4 = q_{14} + q_{54} > 0;$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис. 2д	$p_0 = p_{h1} - A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + \rho g(h_{h1} - h_0)$ $p_1 = A_{nr1}(q_{01} - q_{14})^2 + \rho g(h_{r1} - h_1)$ $p_2 = A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + \rho g(h_{r2} - h_2)$ $p_3 = A_{nr3}(q_{63} + q_{23})^2 + \rho g(h_{r3} - h_3)$ $p_4 = A_{nr4}(q_{14} + q_{54})^2 + \rho g(h_{r4} - h_4)$ $p_5 = A_{nr5}(q_{65} - q_{54})^2 + \rho g(h_{r5} - h_5)$ $p_6 = p_{h2} - A_{h2}(q_{65} + q_{63})^2 + \rho g(h_{h2} - h_6)$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2 + \rho g(h_1 - h_0)$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2 + \rho g(h_2 - h_0)$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2)$ $p_1 - p_4 = A_{14} q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1)$ $p_5 - p_4 = A_{54} q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5)$ $p_6 - p_3 = A_{63} q_{63}^2 + \rho g(h_3 - h_6)$ $p_6 - p_5 = A_{65} q_{65}^2 + \rho g(h_5 - h_6)$	$p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r1}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{01} q_{01}^2$ $p_{h1} + \rho g(h_{h1} - h_{r2}) = A_{h1}(q_{01} + q_{02})^2 + A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{02} q_{02}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r3}) = A_{h2}(q_{65} + q_{63})^2 + A_{nr3}(q_{63} + q_{23})^2 + A_{63} q_{63}^2$ $p_{h2} + \rho g(h_{h2} - h_{r5}) = A_{h2}(q_{65} + q_{63})^2 + A_{nr5}(q_{65} - q_{54})^2 + A_{65} q_{65}^2$ $\rho g(h_{r1} - h_{r4}) = A_{nr4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{nr1}(q_{01} - q_{14})^2 + A_{14} q_{14}^2$ $\rho g(h_{r2} - h_{r3}) = A_{nr3}(q_{23} + q_{63})^2 - A_{nr2}(q_{02} - q_{23})^2 + A_{23} q_{23}^2$ $\rho g(h_{r5} - h_{r4}) = A_{nr4}(q_{14} + q_{54})^2 - A_{nr5}(q_{65} - q_{54})^2 + A_{54} q_{54}^2$ $Q_1 = q_{01} - q_{14} > 0; Q_2 = q_{02} - q_{23} > 0;$ $Q_3 = q_{23} + q_{63} > 0; Q_4 = q_{14} + q_{54} > 0;$ $Q_5 = q_{65} - q_{54} > 0;$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$

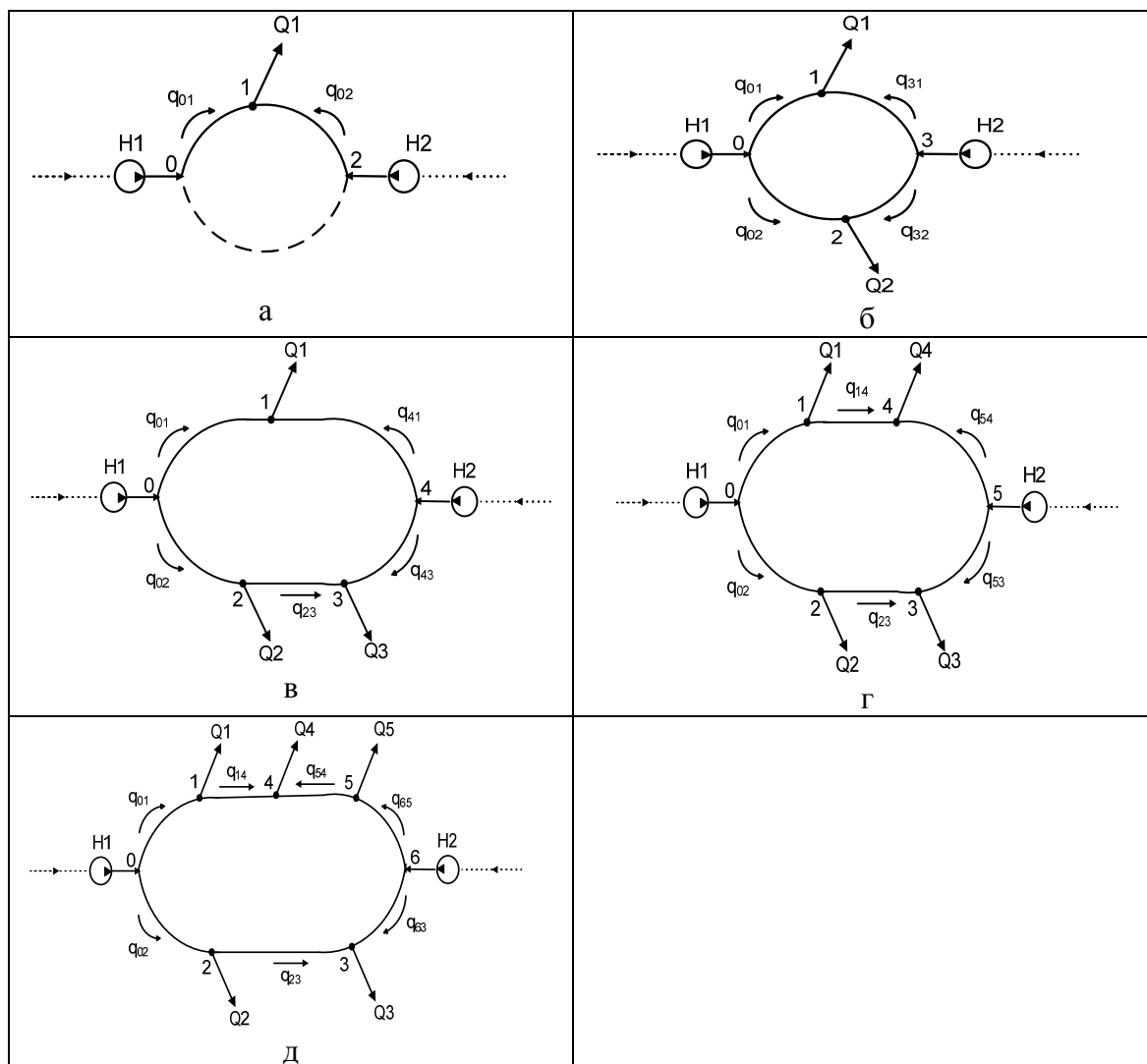


Рис. 2. Гидравлические схемы взаимодействия ПГ КС НППВ  
(а – один ПГ; б – 2 ПГ; в – 3 ПГ; г – 4 ПГ; д – 5 ПГ)

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

При воздействии на сеть НППВ разрушающих факторов (землетрясения, взрывы технологических установок на предприятиях, повреждения в результате износов трубопроводов 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  $n_{в}$ , к общему числу задействованных ПГ  $n_0$ :

$$K_{ж} = n_{в} / n_0. \quad (18)$$

На рис. 3–5 показаны гидравлические схемы КС НППВ с двумя, тремя и четырьмя задействованными ПГ соответственно при повреждениях одного и двух трубопроводов. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты моделирования водоотдачи (с использованием Mathcad14) КС 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 НС, ПГ и расстояний между ними приведены в разделах 4.2 и 4.3 и в работах [13, 14].

При различных вариантах повреждений участков трубопроводов, количестве и порядке задействованных ПГ (табл. 3) КС НППВ обладает достаточной живучестью и в большинстве случаев обеспечивает требуемую водоотдачу. В частности, для схем на рис. 4д и 4з  $K_{ж}=0,667$ ; для схемы на рис. 5г  $K_{ж}=0,75$ . Для остальных случаев  $K_{ж}=1$ .

Общепринятые таблицы в справочниках РТП дают не точную, а приблизительную оценку водоотдачи, что применимо в ситуациях, когда необходимо оперативно оценить обстановку, тогда как приведённый подход позволяет дать объективную оценку и может использоваться при составлении ПТП и паспортов сетей НППВ, а также использоваться в качестве приложения к СП 8.13130.2009.

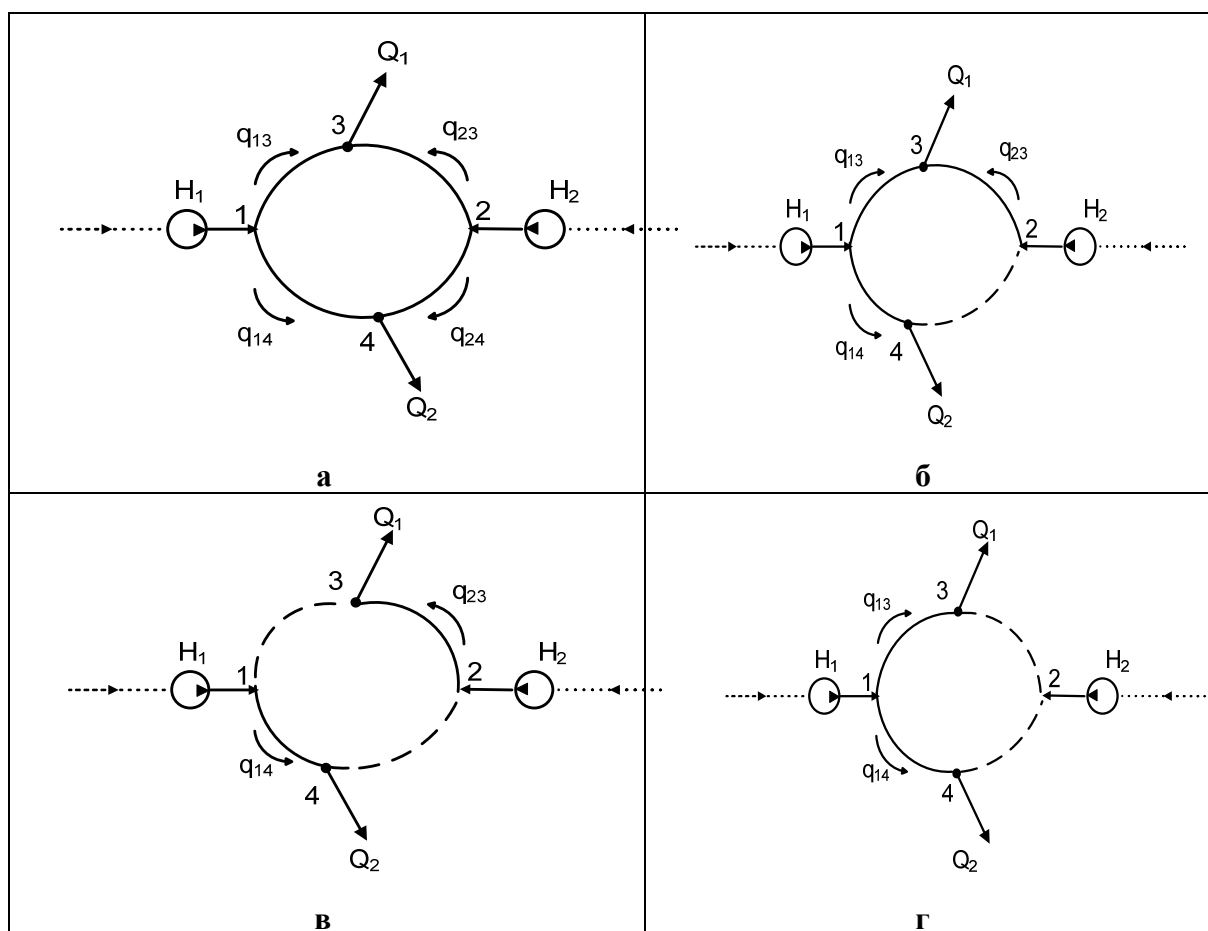


Рис. 3. Схемы КС НППВ с двумя задействованными ПГ ( $n=2$ )  
 а – нормальный режим; б – повреждение одного участка;  
 в, г – повреждение двух участков

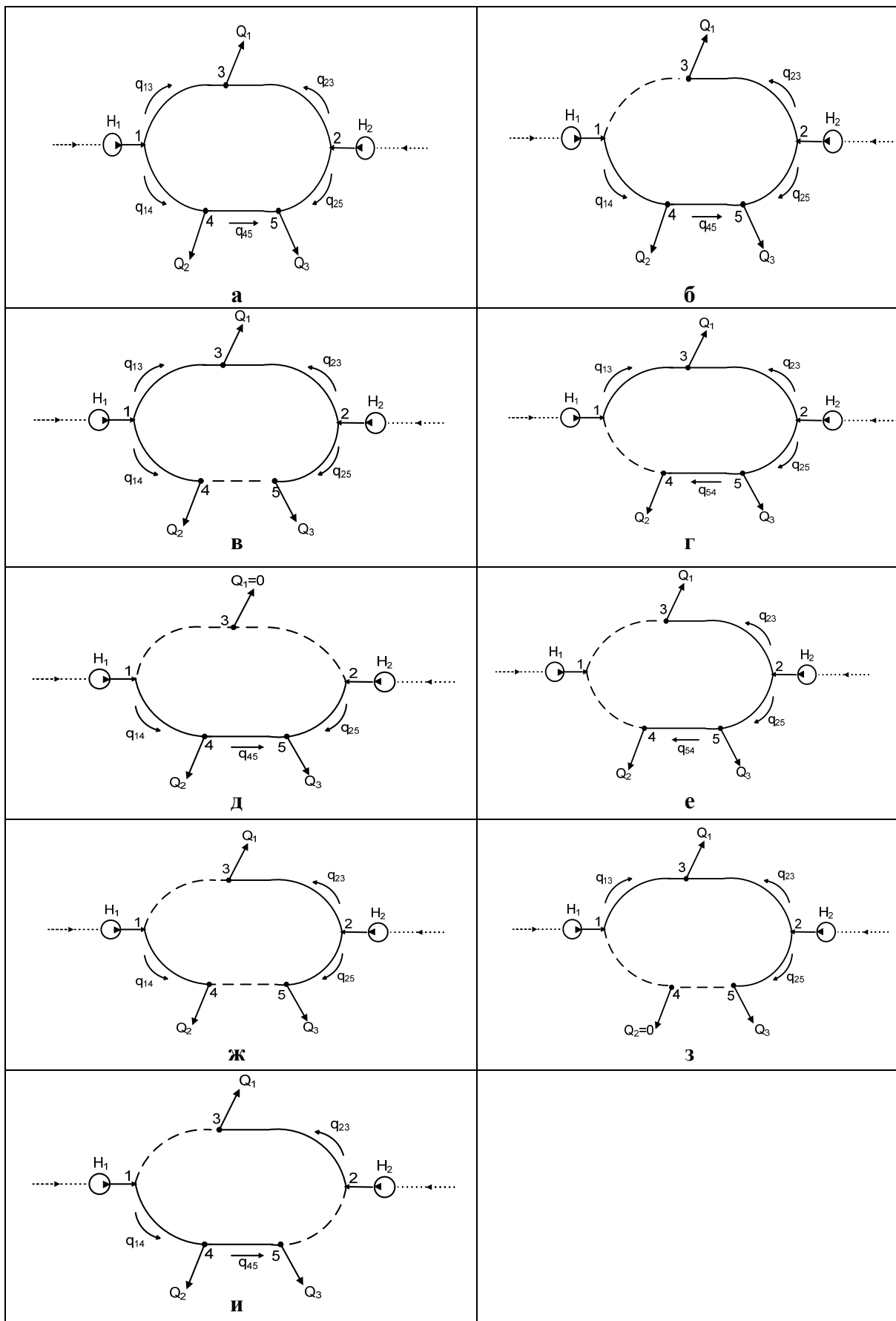


Рис. 4. Схемы КС НППВ с тремя задействованными ПГ ( $n=3$ ):  
 а – нормальный режим; б–г – повреждение одного участка;  
 д–и – повреждение двух участков

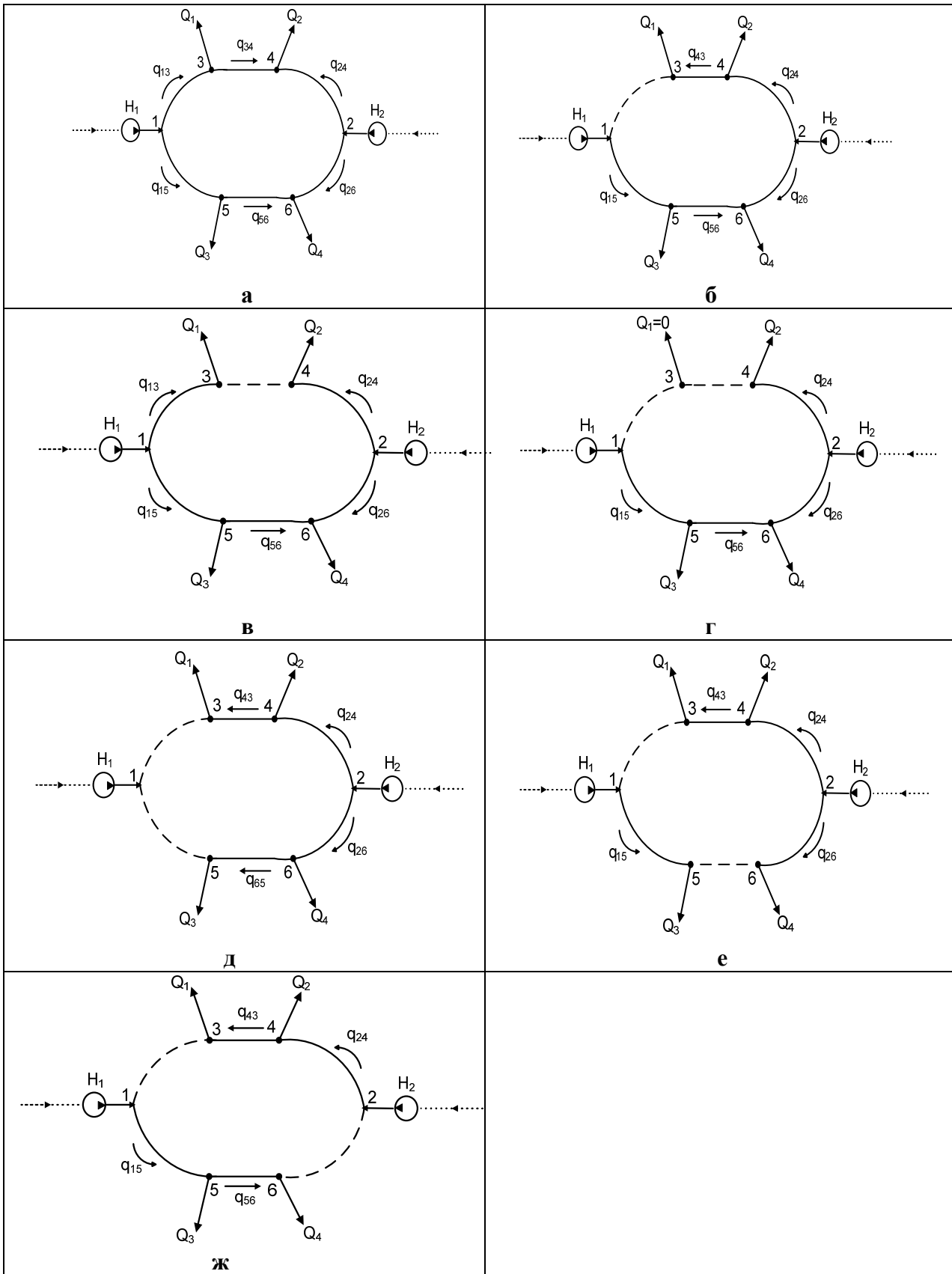


Рис. 5. Схемы КС НППВ с четырьмя задействованными ПГ ( $n=4$ ) по схеме «2+2»:  
**а** – нормальный режим; **б, в** – повреждение одного участка;  
**г–ж** – повреждение двух участков

Таблица 3. 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. 2а
$n=2$	11	16	20	23	25	28	30	58	Рис. 3а
	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. 3б
	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. 3в
	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. 3г
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. 4а
	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. 4б
	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. 4в
	<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. 4г
	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. 4д
	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. 4е
	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. 4ж
	<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. 4з	
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>		
8	12	15	17	19	21	22	24	Рис. 4и	
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>	Рис. 4з	
0	0	0	0	0	0	0	0		
12	17	21	24	27	30	32	34		
25	36	44	51	56	62	67	71	Рис. 4и	
<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		
11	16	20	23	25	28	30	32	Рис. 4и	
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>		

<i>n=4</i>	10	15	18	21	24	26	28	29	Рис. 5а
	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. 5б
	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>	
	8	12	15	17	19	21	22	24	Рис. 5в
	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>	
	0	0	0	0	0	0	0	0	Рис. 5г
	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>	
3	5	6	7	7	8	9	10	Рис. 5д	
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>		
3	5	6	7	8	8	9	10	Рис. 5е	
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>	

Примечание: жирным шрифтом выделена водоотдача сети НППВ в целом

### Литература

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (с изм.). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».
2. Иванов Е.Н. Противопожарное водоснабжение. М.: Стройиздат, 1986.
3. Справочник противопожарного водоснабжения г. Санкт-Петербурга / А.А. Колбашев [и др.]. СПб.: ГУ МЧС России по СПб, 2014. 342 с.
4. СП 8.13130.2009. Системы ППЗ. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности. М.: ФГУ ВНИИ ПО МЧС России, 2009.
5. Обеспечение пожарной безопасности нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Рекомендации. М.: ВНИИПО МЧС России, 2004.
6. Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожаров (утв. МЧС России 1 марта 2013 г.): Письмо № 43-956-18. М., 2013.
7. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. М.: Стройиздат, 1987.
8. Повзик Я.С. Справочник руководителя тушения пожара. М.: ЗАО «Спецтехника», 2004.
9. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников [и др.]. М.: Калан, 2002. 448 с.
10. Таранцев А.А., Шидловский Г.Л., Пивоваров Н.Ю. Оценка экономического ущерба и обоснование риска возникновения крупных пожаров на предприятиях

нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2016. № 3 (39). С. 38–44.

11. Способ подачи огнетушащей жидкости на орошение дыхательной арматуры и орошение резервуаров с нефтепродуктами / А.А. Таранцев [и др.] // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2016. № 3. С. 62–66.

12. Пивоваров Н.Ю. Актуальные проблемы оценки достаточности водоснабжения для ликвидации аварий на предприятиях нефтехимической промышленности // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. Т. 1. № 1 (6). С. 172–174.

13. Таранцев А.А., Пивоваров Н.Ю. Расчетная оценка водоотдачи тупиковых сетей наружного противопожарного водоснабжения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 9. С. 73–78.

14. Таранцев А.А., Пивоваров Н.Ю. Моделирование водоотдачи кольцевых сетей наружного противопожарного водопровода // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 12. С. 69–75.

15. Артамонов В.С., Груданова О.В., Таранцев А.А. Уточнённый порядок расчёта одноуровневых разветвлённых гидравлических сетей // Пожаровзрывобезопасность. 2008. № 3. С. 77–83.

16. Таранцев А.А., Пивоваров Н.Ю. Анализ водоотдачи кольцевой сети наружного противопожарного водопровода с учётом повреждений трубопроводов // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25. № 6. С. 66–78.

## References

1. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyakh pozharnoj bezopasnosti: Feder. zakon ot 22.07.2008. 123-FZ (s izmeneniyami).

2. Ivanov E.N. Protivopozharnoe vodosnabzhenie. M.: Strojizdat, 1986.

3. Kolbashev A.A., Ershov E.V., Prokopenko R.A., Belonozhko I.A. Spravochnik protivopozharnogo vodosnabzheniya g. Sankt-Peterburga. SPb.: GU MChS Rossii po Sankt-Peterburgu, 2014. 342 s.

4. SP 8.13130.2009. Sistemy ppz. Istochniki naruzhnogo protivopozharnogo vodosnabzheniya. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti.

5. Obespechenie pojarnoi bezopasnosti neftepererabativayuschei i neftehimicheskoi promishlennosti. Rekomendacii. M.: VNIPO MChS Rossii, 2004.

6. Metodicheskie rekomendatsii po sostavleniyu planov i kartocek tusheniya pozharov: utv. MChS Rossii 01.03.2013: Pismo 43-956-18. M., 2013.

7. Ivannikov V.P., Klyus P.P. Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara. M.: Strojizdat, 1987.

8. Povzik Ya.S. Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara. M.: Zao «Spetstekhnika», 2004.

9. Sharovarnikov A.F., Molchanov V.P., Voevoda S.S., Sharovarnikov S.A. Tushenie pozharov nefi i nefteproduktov. M.: Kalan, 2002. 448 s.

10. Tarantsev A.A., Shidlovskij G.L., Pivovarov N.Yu. Otsenka ekonomicheskogo uscherba i obosnovanie riska vozniknoveniya krupnykh pozharov na predpriyatiyakh neftekhimicheskoi i neftepererabativayuschej promyshlennosti // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2016. № 3 (39). S. 38–44.

11. Tarantsev A.A., Pivovarov N.Yu. Marukhin P.N, Matveev A.V. Sposob podachi ognetushaschej zhidkosti na oroshenie dykhatelnoj armatury i oroshenie rezervuarov s nefteproduktami // Vestnik Spbu Gps Mchs Rossii. 2016. № 3. S. 62–66.

12. Pivovarov N.Yu. Aktualnye problemy otsenki dostatochnosti vodosnabzheniya dlya likvidatsii avarij na predpriyatiyakh neftekhimicheskoi promyshlennosti // Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstvij chrezvychajnykh situatsij. 2015. Т. 1. № 1 (6). S. 172–174.

13. Tarantsev A.A., Pivovarov N.Yu. Raschetnaya otsenka vodootdachi tupikovykh setej naruzhnogo protivopozharnogo vodosnabzheniya // Pozharovzryvobezопасnost. 2012. T. 21. № 9. S. 73–78.
14. Tarantsev A.A., Pivovarov N.Yu. Modelirovanie vodootdachi koltsevykh setej naruzhnogo protivopozharnogo vodoprovoda // Pozharovzryvobezопасnost. 2014. T. 23. № 12. S. 69–75.
15. Artamonov V.S., Grudanova O.V., Tarantsev A.A. Utochnnyj poryadok rascheta odnourovnevykh razvetvlnnykh gidravlicheskih setej // Pozharovzryvobezопасnost. 2008. № 3. S. 77–83.
16. Tarantsev A.A., Pivovarov N.Yu. Analiz vodootdachi koltsevoj seti naruzhnogo protivopozharnogo vodoprovoda s uchetom povrezhdenij truboprovodov // Pozharovzryvobezопасnost. 2016. T. 25. № 6. S. 66–78.