

А. А. ТАРАНЦЕВ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149); заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН (Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, 13; e-mail: t_54@mail.ru)

Н. Ю. ПИВОВАРОВ, начальник караула, Главное управление МЧС России по Новосибирской области (Россия, 630099, г. Новосибирск, ул. Октябрьская, 80); адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: nikola-pivovarov@mail.ru)

УДК 614.842.62/843.1

АНАЛИЗ ВОДООТДАЧИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОПРОВОДА С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ

Рассмотрена проблема оценки водоотдачи кольцевой сети наружного противопожарного водопровода при повреждении некоторых его участков. Приведены математические модели сети водоснабжения с учетом повреждения ее отдельных участков и при различном числе задействованных пожарных гидрантов. Проведены компьютерные расчеты, результаты которых сопоставлены с табличными данными справочников руководителей тушения пожаров. По результатам расчетов сформулирована и описана проблема живучести сетей водоснабжения. Сделан вывод о целесообразности разработки гидравлических паспортов сетей водоснабжения.

Ключевые слова: водоотдача; сеть наружного противопожарного водоснабжения; пожарный гидрант; повреждение сети; живучесть; коэффициент живучести; анализ; паспорт сети.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.66-78

Тушение пожаров на объектах нефтегазового комплекса и других крупных предприятиях народного хозяйства требует больших расходов воды [1], в том числе на охлаждение и пенное тушение. На подобные объекты составляются планы тушения пожаров, одним из важных разделов которых является оценка достаточности водоотдачи при использовании сетей наружного противопожарного водопровода (НППВ) [2]. Такая оценка осуществляется путем сопоставления расчетного фактического требуемого общего расхода воды Q_{ϕ} [3, 4], включающего расход как на тушение, так и на охлаждение и защиту конструкций зданий и сооружений, с табличным значением водоотдачи сети НППВ, которое согласно [5] определяется в зависимости от диаметра трубопровода d и напора H (табл. 1).

Как показано в работах [6, 7], реальная водоотдача как тупиковых, так и кольцевых сетей НППВ оказывается ниже расчетной, что обусловлено влиянием многих факторов, не учтенных в стандартной методике расчета по [2, 5], таких как количество задействованных пожарных гидрантов (ПГ) N , расстояния между ними, перепады высот местности и т. п. Это, в свою очередь, не раз приводило к опасным инцидентам, связанным с недостатком водоснабже-

Таблица 1. Водоотдача кольцевой сети НППВ Q_k , л/с, согласно [5]

Напор в сети, м вод. ст.	Диаметр труб, мм					
	100	150	200	250	300	350
10	25	55	65	85	115	130
20	30	70	90	115	170	195
30	40	80	110	145	205	235
40	45	95	130	185	235	280
50	50	105	145	200	265	325
60	52	110	163	225	290	380
70	58	130	182	255	330	440
80	64	140	205	287	370	500

ния на реальных крупных пожарах, происходивших на рассматриваемых объектах [1, 8], хотя теоретически (согласно документам оперативного планирования [2] и справочникам [5]) сети НППВ должны обеспечивать необходимую водоотдачу.

Помимо этого, при тушении пожаров возникает проблема надежности и живучести сетей НППВ, так как их износ на большинстве промышленных предприятий (в том числе нефтегазового комплекса),

построенных в Советском Союзе в 60–90-е года 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. [9].

Кроме того, сети НППВ могут подвергаться негативному воздействию факторов ЧС (например, разрушающих нагрузок при расположении сетей в сейсмически активных районах), повреждению при проводимых поблизости строительных работах и др.

При повреждении трубопроводов аварийные участки отсекаются задвижками, что позволяет сети НППВ еще какое-то время обеспечивать некоторую водоотдачу до проведения ремонта (что характерно для кольцевых сетей НППВ).

Таким образом, возникает проблема оценки *жизнестойкости* сети НППВ (т. е. возможности обеспечения водоотдачи при выходе из строя ее отдельных участков), которая может осуществляться посредством математического моделирования водоотдачи.

За основу модели сети НППВ был взят кольцевой наружный водопровод с двумя насосными станциями. В рамках данной статьи рассмотрены варианты работы сети при различных вариантах повреждений (разрывов) трубопроводов и количестве задействованных ПГ от 2 до 4 (рис. 1–3)*.

В табл. 2–4 приведены расчетные модели при стандартных допущениях [10, 11].

1. Потери давления Δp между i -м и j -м ПГ пропорциональны квадрату расхода жидкости и перепаду высот:

$$\Delta p = A_{ij} q_{ij}^2 \pm \rho g \Delta h_{ij}, \quad (1)$$

где A_{ij} — коэффициент сопротивления между i -м и j -м ПГ;

q_{ij} — расход воды от i -го к j -му задействованному ПГ, м³/с;

ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³ (для воды $\rho \approx 1000$ кг/м³);

g — ускорение свободного падения, м/с²; $g = 9,81$ м/с²;

* На рис. 1–3 показаны только те ПГ, которые задействованы при тушении, а остальные учтены как местные гидросопротивления.

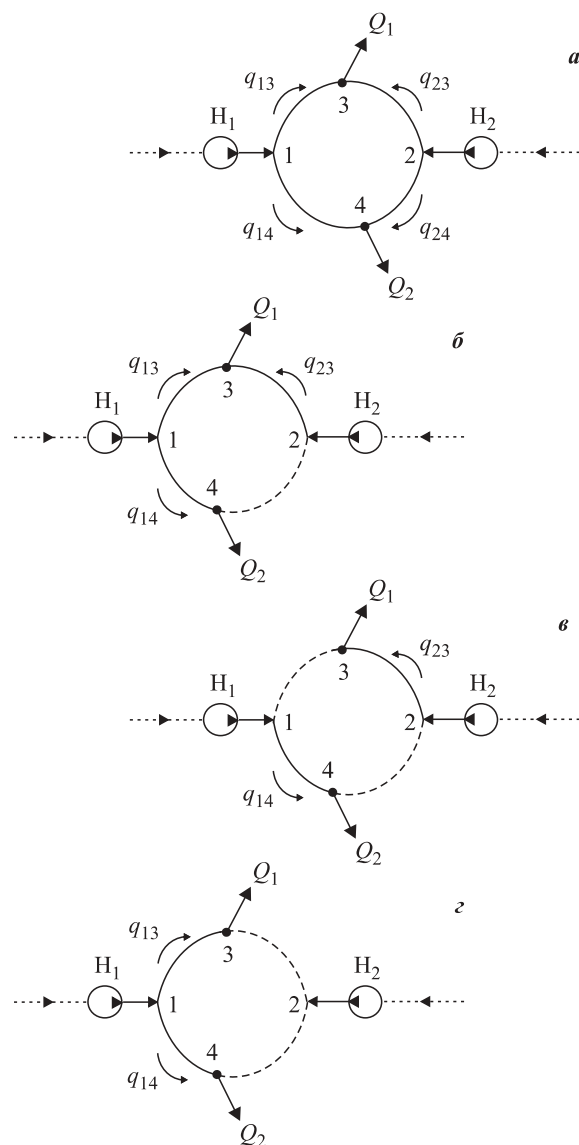


Рис. 1. Схемы кольцевой сети с двумя ПГ ($N = 2$): а — нормальный режим; б — повреждение одного трубопровода; в, г — повреждение двух трубопроводов

Δh_{ij} — перепад высот между i -м и j -м задействованными ПГ (если i -й гидрант ниже j -го, то $\Delta h_{ij} > 0$; в противном случае — $\Delta h_{ij} \leq 0$).

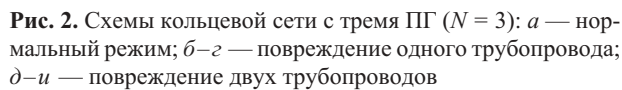
Коэффициент A_{ij} учитывает линейные и местные гидравлические потери и определяется по выражению

$$A_{ij} = 0,5\rho \sum_{k=1}^n \frac{\xi_{lk} + \xi_{mk}}{F_k^2}, \quad (2)$$

где n — количество отрезков трубопровода, образующих рассматриваемый участок между i -м и j -м ПГ;

ξ_{lk}, ξ_{mk} — коэффициент линейного сопротивления и сумма коэффициентов местных сопротивлений на k -м отрезке трубопровода;

F_k — площадь проходного сечения трубопровода на k -м отрезке трубопровода, м².



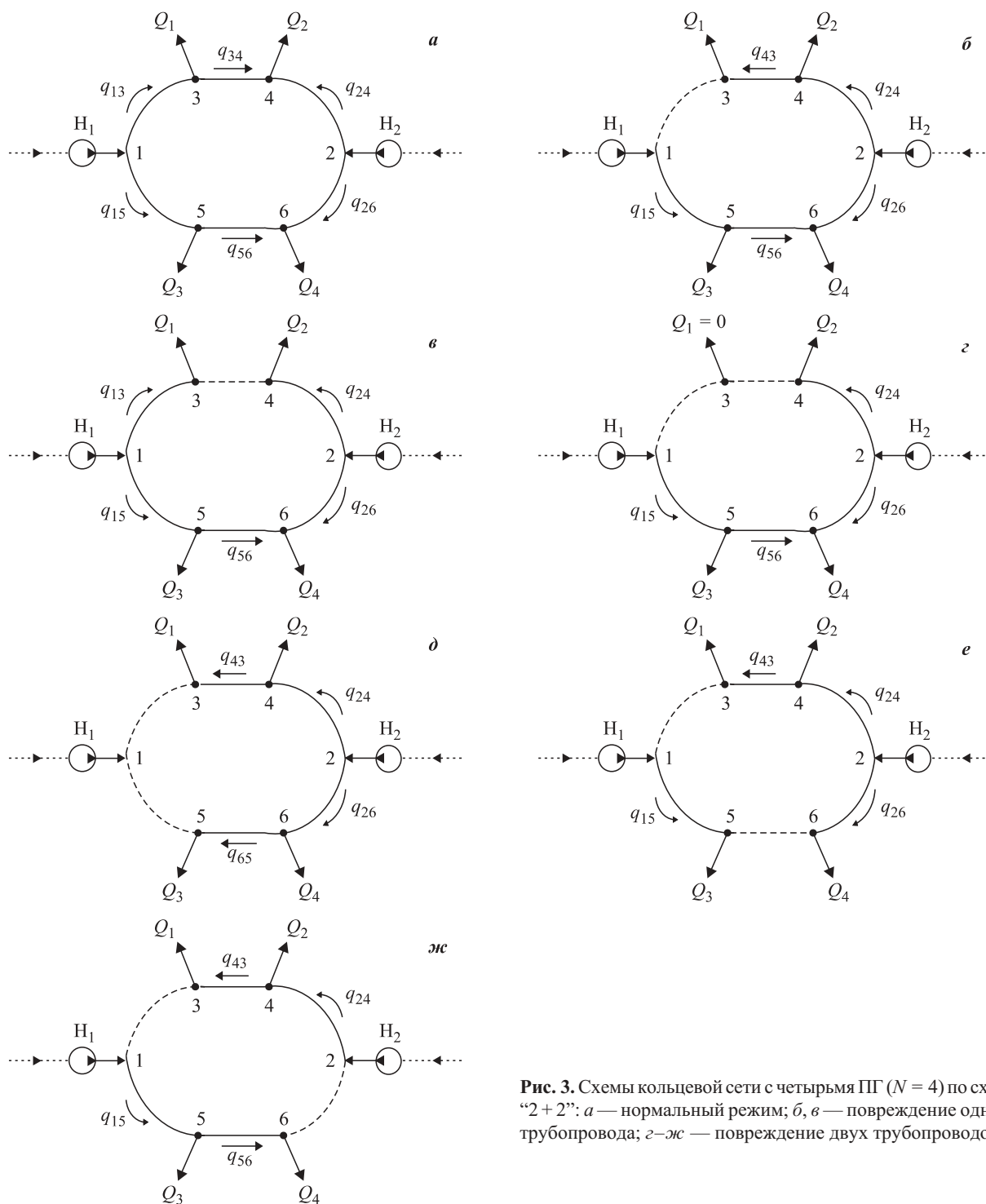


Рис. 3. Схемы кольцевой сети с четырьмя ПГ ($N = 4$) по схеме “2+2”: а — нормальный режим; б, в — повреждение одного трубопровода; г–ж — повреждение двух трубопроводов

Значения ξ_{mk} определяются по справочникам (например, [12]), а ξ_{lk} — по выражению

$$\xi_{lk} = \lambda L/d, \quad (3)$$

где λ — коэффициент, зависящий от шероховатости стенок трубы и числа Рейнольдса, который может быть оценен также по формуле Альтшуля:

$$\lambda \approx 0,11(K_3/d)^{0,25}, \quad (4)$$

K_3 — абсолютная эквивалентная шероховатость стенок для труб из различных материалов [12]);

L, d — длина и диаметр трубопровода на k -м отрезке, м.

2. Выражение для напорно-расходной характеристики насоса имеет вид [6, 7]:

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

где p, Q — давление и расход воды на выходе из насоса;

p_n, A_n — гидравлические характеристики насоса.

Насосы на рис. 1–3 могут быть как одинаковыми, так и различными, но в любом случае расчет их на

Таблица 2. 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. 1,а	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{24})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{14} + q_{24})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{24})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_4(q_{14} + q_{24})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{24})^2 - A_4(q_{14} + q_{24})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23};$ $Q_2 = q_{14} + q_{24};$ $Q_k = Q_1 + Q_2$
Рис. 1,б	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}q_{23}^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 = (A_{14} + A_4)q_{14}^2 + \rho g(h_{г2} - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н2} - (A_{н2} + A_{23})q_{23}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $(A_{14} + A_4)q_{14}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{г2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23};$ $Q_2 = q_{14};$ $Q_k = Q_1 + Q_2$
Рис. 1,в	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}q_{23}^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_1 = (A_{14} + A_4)q_{14}^2 + \rho g(h_{г2} - h_1)$	<p>Явные выражения:</p> $Q_1 = \{[p_{н2} - \rho g(h_{г1} - h_{н1})]/(A_{н2} + A_{23} + A_3)\}^{0,5};$ $Q_2 = \{[p_{н1} - \rho g(h_{г2} - h_{н1})]/(A_{н1} + A_{14} + A_4)\}^{0,5};$ $Q_k = Q_1 + Q_2$
Рис. 1,г	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(Q_1 + Q_2)^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_1 = (A_{13} + A_3)Q_1^2 + \rho g(h_{г1} - h_1);$ $p_1 = (A_{14} + A_4)Q_2^2 + \rho g(h_{г2} - h_1)$	$p_{н1} - A_{н1}(Q_1 + Q_2)^2 - \rho g(h_{г1} - h_{н1}) = (A_{13} + A_3)Q_1^2;$ $Q_2 = \{[(A_{13} + A_3)Q_1^2 + \rho g(h_{г1} - h_{г2})]/(A_{14} + A_4)\}^{0,5};$ $Q_k = Q_1 + Q_2$

поддержание требуемого напора проводится с учетом данных табл. 1 [5]. Предполагается также, что надежность насосов выше, чем трубопроводов, влияние разрывов которых на живучесть сети рассматривается в данной статье.

3. Водоотдача из j -го ПГ Q_j может быть оценена из выражения

$$Q_j = q_{ij} \pm q_{jk} = (p_j / A_{пгj})^{0,5}, \quad (6)$$

где q_{jk} — расход от j -го задействованного ПГ к k -му;
 p_j, Q_j — давление и расход на выходе из j -го ПГ;
 $A_{пгj}$ — коэффициент сопротивления j -го ПГ;
 знак + или – выбирается в зависимости от направления движения жидкости.

На основе выражений (1)–(6) составляется система нелинейных (квадратичных) алгебраических уравнений, решение которых численными методами [13] позволяет определить расходы $\{Q_j\}$ из задействованных ПГ сети НППВ. Искомая водоотдача кольцевой сети НППВ Q_k определяется как сумма расходов из N задействованных ПГ:

$$Q_k = \sum_{j=1}^N Q_j. \quad (7)$$

В табл. 5 приведены результаты моделирования водоотдачи кольцевой сети НППВ без повреждений

и с повреждениями, а также (для сравнения) значения водоотдачи по справочнику [5] 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 работе [6].

Как следует из анализа результатов моделирования (см. табл. 5), 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* $K_{ж}$, который при повреждении сети НППВ выражается отношением числа задействованных ПГ, обеспечивающих водоотдачу, к общему числу задействованных ПГ. Очевидно, для схем на рис. 1,в и 1,г $K_{ж} = 1$, так как оба задействованных ПГ обеспечивают водоотдачу.

При задействовании трех ПГ ($N = 3$) и повреждении одного трубопровода (см. рис. 2,б–г) все эти ПГ обеспечивают водоотдачу, ввиду чего $K_{ж} = 1$. При двух повреждениях из пяти возможных ситуаций (см. рис. 2,д–и) в двух случаях один ПГ оказывается неработоспособным (см. рис. 2,д и 2,з), тогда $K_{ж} = (3 \cdot 3 + 2 \cdot 2)/(5 \cdot 3) \approx 0,867$. При задействовании

Таблица 3. 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. 2,а	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{45} + q_{25})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{45}q_{45}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{г2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23};$ $Q_2 = q_{14} - q_{45};$ $Q_3 = q_{45} + q_{25};$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 2,б	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{45} + q_{25})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - (A_{н1} + A_{14})q_{14}^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_3 + A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{45}q_{45}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{г2});$ $Q_1 = q_{23};$ $Q_2 = q_{14} - q_{45};$ $Q_3 = q_{45} + q_{25};$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 2,в	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{14}^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{25}^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - (A_4 + A_{14})q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_5 + A_{25})q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23};$ $Q_2 = q_{14};$ $Q_3 = q_{25};$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 2,г	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{13}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_5 - p_4 = A_{54}q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{54}^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{25} - q_{54})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - A_{н1}q_{13}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{25} - q_{54})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $A_5(q_{25} - q_{54})^2 - (A_4 + A_{54})q_{54}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{г3});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23};$ $Q_2 = q_{54};$ $Q_3 = -q_{54} + q_{25};$ $Q_K = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 2,д	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}q_{25}^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$ $p_4 = A_4(q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{45} + q_{25})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - A_{н1}q_{14}^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - (A_{н2} + A_{25})q_{25}^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - A_5(q_{45} + q_{25})^2 - A_{45}q_{45}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{г2});$ $Q_1 = 0;$ $Q_2 = q_{14} - q_{45};$ $Q_3 = -q_{45} + q_{25};$ $Q_K = Q_2 + Q_3$

Схема	Уравнения гидравлического баланса	Выражения для моделирования
Рис. 2,е	$p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_5 - p_4 = A_{54}q_{54}^2 + \rho g(h_4 - h_5);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{54}^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{25} - q_{54})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_3 - A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_5(q_{25} - q_{54})^2 - A_{25}q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $A_5(q_{25} - q_{54})^2 - (A_4 + A_{54})q_{54}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{г3});$ $Q_1 = q_{23};$ $Q_2 = q_{54};$ $Q_3 = -q_{54} + q_{25};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 2,ж	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{14}^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{25}^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - (A_{н1} + A_4)q_{14}^2 - A_{14}q_{14}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_3 - A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_5 + A_{25})q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $Q_1 = q_{23};$ $Q_2 = q_{14};$ $Q_3 = q_{25};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3$
Рис. 2,з	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{14})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_2 - p_5 = A_{25}q_{25}^2 + \rho g(h_5 - h_2);$ $p_3 = A_3(q_{13} + q_{23})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_5 = A_5q_{25}^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - A_{н1}q_{13}^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - A_3(q_{13} + q_{23})^2 - A_{23}q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{23} + q_{25})^2 - (A_5 + A_{25})q_{25}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н2});$ $Q_1 = q_{13} + q_{23};$ $Q_2 = 0;$ $Q_3 = q_{25};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_3$
Рис. 2,и	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{14}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}q_{23}^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_4 = A_{14}q_{14}^2 + \rho g(h_4 - h_1);$ $p_2 - p_3 = A_{23}q_{23}^2 + \rho g(h_3 - h_2);$ $p_4 - p_5 = A_{45}q_{45}^2 + \rho g(h_5 - h_4);$ $p_3 = A_3q_{23}^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{14} - q_{45})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{45}^2 + \rho g(h_{г3} - h_5)$	$p_{н1} - (A_{н1} + A_{14})q_{14}^2 - A_4(q_{14} - q_{45})^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н1});$ $p_{н2} - (A_{н2} + A_3 + A_{23})q_{23}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н2});$ $A_4(q_{14} - q_{45})^2 - (A_5 + A_{45})q_{45}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{г2});$ $Q_1 = q_{23};$ $Q_2 = q_{14} - q_{45};$ $Q_3 = q_{45};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Таблица 4. 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. 3,а	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{15})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_3 - p_4 = A_{34}q_{34}^2 + \rho g(h_4 - h_3);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56}q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3(q_{13} - q_{34})^2 + \rho g(h_{г1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{34} + q_{24})^2 + \rho g(h_{г2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{г3} - h_5);$ $p_6 = A_6(q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{г4} - h_6)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{15})^2 - A_3(q_{13} - q_{34})^2 - A_{13}q_{13}^2 = \rho g(h_{г1} - h_{н1});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{15})^2 - A_5(q_{15} - q_{56})^2 - A_{15}q_{15}^2 = \rho g(h_{г3} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_4(q_{34} + q_{24})^2 - A_{24}q_{24}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{26}q_{26}^2 = \rho g(h_{г4} - h_{н2});$ $A_3(q_{13} - q_{34})^2 - A_4(q_{34} + q_{24})^2 - A_{34}q_{34}^2 = \rho g(h_{г2} - h_{г1});$ $A_5(q_{15} - q_{56})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{56}q_{56}^2 = \rho g(h_{г4} - h_{г3});$ $Q_1 = q_{13} - q_{34};$ $Q_2 = q_{24} + q_{34};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

Схема	Уравнения гидравлического баланса	Выражения для моделирования
Рис. 3,б	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43}q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56}q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3q_{34}^2 + \rho g(h_{т1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{34} + q_{24})^2 + \rho g(h_{т2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{т3} - h_5);$ $p_6 = A_6(q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{т4} - h_6)$	$p_{н1} - (A_{н1} + A_{15})q_{15}^2 - A_5(q_{15} - q_{56})^2 = \rho g(h_{т3} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_4(q_{24} - q_{43})^2 - A_{24}q_{24}^2 = \rho g(h_{т2} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{26}q_{26}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{н2});$ $A_4(q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43})q_{43}^2 = \rho g(h_{т1} - h_{т2});$ $A_5(q_{15} - q_{56})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{56}q_{56}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{т3});$ $Q_1 = q_{43};$ $Q_2 = q_{24} - q_{43};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис. 3,в	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{15})^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_3 = A_{13}q_{13}^2 + \rho g(h_3 - h_1);$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56}q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3q_{13}^2 + \rho g(h_{т1} - h_3);$ $p_4 = A_4q_{24}^2 + \rho g(h_{т2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{т3} - h_5);$ $p_6 = A_6(q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{т4} - h_6)$	$p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{15})^2 - (A_3 + A_{13})q_{13}^2 = \rho g(h_{т1} - h_{н1});$ $p_{н1} - A_{н1}(q_{13} + q_{15})^2 - A_5(q_{15} - q_{56})^2 - A_{15}q_{15}^2 = \rho g(h_{т3} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - (A_4 + A_{24})q_{24}^2 = \rho g(h_{т2} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{26}q_{26}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{н2});$ $A_5(q_{15} - q_{56})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{56}q_{56}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{т3});$ $Q_1 = q_{13};$ $Q_2 = q_{24};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис. 3,г	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_5 - p_6 = A_{56}q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_4 = A_4q_{24}^2 + \rho g(h_{т2} - h_4);$ $p_5 = A_5(q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{т3} - h_5);$ $p_6 = A_6(q_{56} + q_{26})^2 + \rho g(h_{т4} - h_6)$	$p_{н1} - (A_{н1} + A_{15})q_{15}^2 - A_5(q_{15} - q_{56})^2 = \rho g(h_{т3} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - (A_4 + A_{24})q_{24}^2 = \rho g(h_{т2} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{26}q_{26}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{н2});$ $A_5(q_{15} - q_{56})^2 - A_6(q_{56} + q_{26})^2 - A_{56}q_{56}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{т3});$ $Q_1 = 0;$ $Q_2 = q_{24};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56} + q_{26};$ $Q_{\kappa} = Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис. 3,д	$p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43}q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_6 - p_5 = A_{65}q_{65}^2 + \rho g(h_5 - h_6);$ $p_3 = A_3q_{43}^2 + \rho g(h_{т1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{24} - q_{43})^2 + \rho g(h_{т2} - h_4);$ $p_5 = A_5q_{65}^2 + \rho g(h_{т3} - h_5);$ $p_6 = A_6(q_{26} - q_{65})^2 + \rho g(h_{т4} - h_6)$	$p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_4(q_{24} - q_{43})^2 - A_{24}q_{24}^2 = \rho g(h_{т2} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_6(q_{26} - q_{65})^2 - A_{26}q_{26}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{н2});$ $A_4(q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43})q_{43}^2 = \rho g(h_{т1} - h_{т2});$ $A_6(q_{26} - q_{65})^2 - (A_5 + A_{65})q_{65}^2 = \rho g(h_{т3} - h_{т4});$ $Q_1 = q_{43};$ $Q_2 = q_{24} - q_{43};$ $Q_3 = q_{65};$ $Q_4 = -q_{65} + q_{26};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$
Рис. 3,е	$p_1 = p_{н1} - A_{н1}q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{н1});$ $p_2 = p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - \rho g(h_2 - h_{н2});$ $p_1 - p_5 = A_{15}q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24}q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_2 - p_6 = A_{26}q_{26}^2 + \rho g(h_6 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43}q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_3 = A_3q_{34}^2 + \rho g(h_{т1} - h_3);$ $p_4 = A_4(q_{43} + q_{24})^2 + \rho g(h_{т2} - h_4);$	$p_{н1} - (A_{н1} + A_5 + A_{15})q_{15}^2 = \rho g(h_{т3} - h_{н1});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - A_4(q_{24} - q_{43})^2 - A_{24}q_{24}^2 = \rho g(h_{т2} - h_{н2});$ $p_{н2} - A_{н2}(q_{24} + q_{26})^2 - (A_6 + A_{26})q_{26}^2 = \rho g(h_{т4} - h_{н2});$ $A_4(q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43})q_{43}^2 = \rho g(h_{т1} - h_{т2});$ $Q_1 = q_{43};$ $Q_2 = q_{24} - q_{43};$ $Q_3 = q_{15};$ $Q_4 = q_{26};$ $Q_{\kappa} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

Схема	Уравнения гидравлического баланса	Выражения для моделирования
Рис. 3,е	$p_5 = A_5 q_{15}^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6 q_{26}^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	
Рис. 3,ж	$p_1 = p_{n1} - A_{n1} q_{15}^2 - \rho g(h_1 - h_{n1});$ $p_2 = p_{n2} - A_{n2} q_{24}^2 - \rho g(h_2 - h_{n2});$ $p_1 - p_5 = A_{15} q_{15}^2 + \rho g(h_5 - h_1);$ $p_2 - p_4 = A_{24} q_{24}^2 + \rho g(h_4 - h_2);$ $p_4 - p_3 = A_{43} q_{43}^2 + \rho g(h_3 - h_4);$ $p_5 - p_6 = A_{56} q_{56}^2 + \rho g(h_6 - h_5);$ $p_3 = A_3 q_{43}^2 + \rho g(h_{r1} - h_3);$ $p_4 = A_4 (q_{24} - q_{43})^2 + \rho g(h_{r2} - h_4);$ $p_5 = A_5 (q_{15} - q_{56})^2 + \rho g(h_{r3} - h_5);$ $p_6 = A_6 q_{56}^2 + \rho g(h_{r4} - h_6)$	$p_{n1} - (A_{n1} + A_{15}) q_{15}^2 - A_5 (q_{15} - q_{56})^2 = \rho g(h_{r3} - h_{n1});$ $p_{n2} - (A_{n2} + A_{24}) q_{24}^2 - A_4 (q_{24} - q_{43})^2 = \rho g(h_{r2} - h_{n2});$ $A_4 (q_{24} - q_{43})^2 - (A_3 + A_{43}) q_{43}^2 = \rho g(h_{r1} - h_{r2});$ $A_5 (q_{15} - q_{56})^2 - (A_6 + A_{56}) q_{56}^2 = \rho g(h_{r4} - h_{r3});$ $Q_1 = q_{43};$ $Q_2 = q_{24} - q_{43};$ $Q_3 = q_{15} - q_{56};$ $Q_4 = q_{56};$ $Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

Таблица 5. Результаты моделирования водоотдачи кольцевой сети 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 задей- ствованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
$N = 1$	28	39	48	55	62	68	73	78	—
$N = 2$	11	16	20	23	25	28	30	58	Рис. 1,а
	25	36	44	51	57	62	67	56	
	36	42	64	74	82	90	97	114	
	1	1	1	1	1	2	2	2	Рис. 1,б
	23	32	39	45	50	55	59	63	
	24	33	40	46	51	57	61	65	
	11	16	20	23	25	28	30	32	Рис. 1,в
	21	29	36	42	46	51	55	59	
	32	45	56	65	71	79	85	91	
	5	7	9	11	12	13	14	15	Рис. 1,г
	21	29	36	42	46	51	55	59	
	26	36	45	53	58	64	69	74	
$N = 3$	13	18	23	26	29	32	34	37	Рис. 2,а
	13	19	23	26	30	32	35	37	
	17	24	29	33	37	41	44	47	
	43	61	75	85	96	105	113	121	
	9	12	15	17	19	21	23	24	Рис. 2,б
	16	22	27	31	35	38	41	44	
	17	24	29	33	37	41	44	47	
	42	58	71	81	91	100	108	115	
	11	16	20	23	26	28	30	32	Рис. 2,в
	14	20	25	29	32	35	38	41	
	17	24	30	34	38	42	45	48	
	42	60	75	86	96	105	113	121	
	5	7	8	9	11	12	13	14	Рис. 2,г
	7	11	13	15	17	19	20	22	
	25	36	44	50	56	62	67	71	
	37	54	65	74	84	93	100	107	

Продолжение табл. 5

Количество задействованных ПГ	Водоотдача сети Q_k , л/с, при диаметре трубы $d = 150$ мм и заданном напоре H , м вод. ст.								Схема задей- ствованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
$N = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	Рис. 2,д
	17	24	30	35	39	42	46	49	
	18	25	31	36	40	44	47	50	
	35	49	61	71	79	86	93	99	
	4	6	8	9	10	11	12	13	Рис. 2,е
	7	10	12	14	16	17	18	20	
	8	12	14	17	19	20	22	24	
	19	28	34	40	45	48	52	57	
	8	12	15	17	19	21	22	24	Рис. 2,ж
	11	16	19	22	25	27	29	31	
	21	29	36	42	46	51	55	59	
	40	57	70	81	90	99	106	114	
	0	0	0	0	0	0	0	0	Рис. 2,з
	12	17	21	24	27	30	32	34	
	25	36	44	51	56	62	67	71	
	37	53	65	75	83	92	99	105	
	9	12	15	17	20	21	23	25	Рис. 2,и
	11	16	20	23	25	28	30	32	
	14	19	24	27	30	33	36	38	
	34	47	59	67	75	82	89	95	
$N = 4$	10	15	18	21	24	26	28	29	Рис. 3,а
	10	15	19	22	24	26	28	30	
	12	16	20	23	26	28	30	32	
	12	16	20	23	26	28	30	32	
	44	62	77	89	100	108	116	123	Рис. 3,б
	3	5	6	7	8	9	9	10	
	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. 3,в
	39	57	70	81	91	100	107	115	
	8	12	15	17	19	21	22	24	
	11	16	20	23	26	28	31	33	
	11	16	20	23	26	28	31	33	Рис. 3,г
	12	17	21	24	27	29	32	34	
	42	61	76	87	98	106	116	124	
	0	0	0	0	0	0	0	0	Рис. 3,д
	8	12	15	17	19	21	23	25	
	15	22	27	31	35	39	41	44	
	16	23	28	32	36	40	43	46	
	39	57	70	80	90	100	107	115	Рис. 3,е
	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	Рис. 3,ж
	19	28	34	40	44	49	53	57	

Количество задействованных ПГ	Водоотдача сети Q_k , л/с, при диаметре трубы $d = 150$ мм и заданном напоре H , м вод. ст.								Схема задействованных ПГ
	10	20	30	40	50	60	70	80	
$N = 4$	3	5	6	7	8	8	9	10	Рис. 3,е
	5	7	9	11	12	13	14	15	
	11	16	19	22	24	27	29	31	
	21	29	36	41	46	51	55	58	
	40	57	70	81	90	99	107	114	
По справочнику РТП [5]	55	70	80	95	105	110	130	140	

четырёх ПГ ($N = 4$) и повреждении одного трубопровода (см. рис. 3,б и 3,в) все эти ПГ обеспечивают водоотдачу, ввиду чего $K_{ж} = 1$. А при двух повреждениях из четырех возможных ситуаций (см. рис. 3,з–ж) один ПГ оказывается неработоспособным (см. рис. 3,з), тогда $K_{ж} = (3 \cdot 4 + 1 \cdot 3)/(4 \cdot 4) \approx 0,938$. Подобным образом можно оценить живучесть сети НППВ при различных вариантах повреждений и количествах задействованных ПГ.

Таким образом, показана возможность построения математических моделей кольцевой сети НППВ при различных вариантах повреждений трубопроводов; проведены расчеты водоотдачи, подтверждающие ее живучесть. В качестве практического применения данный материал целесообразно исполь-

зовать при разработке паспортов для сетей НППВ с учетом перепадов высот местности, количества задействованных ПГ, ожидаемой схемы их расположения и характеристик насосных станций. При составлении таких паспортов строится расчетная таблица реальной водоотдачи с учетом ожидаемых факторов внутреннего и внешнего отрицательного воздействия (в том числе повреждений участков трубопроводов) на сеть. Паспорта сетей НППВ целесообразно использовать при разработке документов оперативного планирования [2] вместо табл. 1, приводимой в справочной литературе [5]. Кроме того, изложенную методику расчета водоотдачи сетей НППВ имеет смысл включить в специальное приложение к СП 8.13130.2009 [14, 15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П., Воевода С. С., Шароварников С. А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. — М. : Калан, 2002. — 448 с.
2. Методические рекомендации по составлению планов и карточек тушения пожаров : утв. письмом МЧС России от 01.03.2013 № 43-956-18. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499028650> (дата обращения: 30.03.2016).
3. Sårdqvist S., Holmstedt G. Correlation between firefighting operation and fire area: analysis of statistics // Fire Technology. — 2000. — Vol. 36, No. 2. — P. 109–130. DOI: 10.1023/A:1015450308130.
4. Adrian R., Cimolino U., Fuchs M., Südmersen J., Volkmar G. Brandbekämpfung im Innenangriff. — Ecomed Sicherheit GmbH, 2013. — 304 s.
5. Повзик Я. С. Справочник руководителя тушения пожара. — М. : ЗАО «Спецтехника», 2004. — 361 с.
6. Таранцев А. А., Пивоваров Н. Ю. Расчетная оценка водоотдачи тупиковых сетей наружного противопожарного водоснабжения // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 9. — С. 73–78.
7. Пивоваров Н. Ю., Таранцев А. А. Моделирование водоотдачи кольцевых сетей наружного противопожарного водопровода // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 69–75.
8. Маршалл В. Основные опасности химических производств : пер. с англ. / Под ред. Б. Б. Чайванова, А. Н. Черноплекова. — М. : Мир, 1989. — 672 с.
9. Храменков С. В., Алифференков А. Д., Примин О. Г. Трубы из высокопрочного чугуна для систем водоснабжения и водоотведения : монография. — М. : МГСУ, 2015. — 192 с.
10. Reynolds O. On rolling-friction // Phil. Trans. Roy. Soc. London. — 1876. — Vol. 166, pt. 1. — P. 155–177.
11. Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). — Изд. 4-е, перераб. и доп. — Л. : Энергоиздат, 1982. — 672 с.
12. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М. : Энергия, 1975. — 672 с.
13. Очков В. Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. — СПб. : БХВ-Петербург, 2007. — 368 с.

14. СП 8.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности. — Введ. 01.05.2009. — М. : ВНИИПО, 2009.
15. NFPA 1142. Standard on water supplies for suburban and rural fire fighting. — National Fire Protection Association, 2012. URL: <http://www.indabook.org/d/NFPA-National-Fire-Protection-Association.pdf> (дата обращения: 29.03.2016).

Материал поступил в редакцию 6 апреля 2016 г.

Для цитирования: Таранцев А. А., Пивоваров Н. Ю. Анализ водоотдачи кольцевой сети наружного противопожарного водопровода с учетом повреждений трубопроводов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 6. — С. 66–78. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.66-78.

ANALYSIS OF THE YIELD OF RING NETWORKS OF OUTDOOR FIRE WATER SUPPLY SYSTEM WITH CONSIDERATION OF PIPELINE DAMAGE

TARANTSEV A. A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Fire and Rescue Works Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation); Head of Laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (12-ya Line VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; e-mail address: t_54@mail.ru)

PIVOVAROV N. Yu., Head of Fire Guard, Main Department of Emercom of Russia in Novosibirsk Region (Oktyabrskaya St., 80, Novosibirsk, 630099, Russian Federation); Adjunct of Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail address: nikola-pivovarov@mail.ru)

ABSTRACT

In this article the authors analyze the yield of firefighting external water supply (FEWS) subject to possible damage of pipelines at different sites. Standard methods of assessing water loss dead-end and ring networks FEWS does not take into account the numerous factors which affect the flow of water and also the scenario of possible collision damage different sections of a piping network FEWS isn't considered.

For the calculation the authors used a numerical method of mathematical modeling of water loss ring network FEWS. On the basis of Darcy's law — Weisbach and mathematical description of the pressure-flow characteristics used in the pumping station pumps there are composed a system of equations for pressure balances of the ring network FEWS with a set number of fire hydrants (FH) and damage to different pipeline sections. To solve systems of equations there are used methods of discrete mathematics and the mathematical program package Mathcad 14. The obtained results are compared with the reference data and the calculation results obtained in a similar way in the simulation of ring network FEWS without considering the damage.

For the first time the authors introduce the notion of survivability of the ring network FEWS. To evaluate the effectiveness of yield ring network FEWS in terms of the damage some sections it is proposed to use the coefficient of survivability, which is calculated as the ratio of the number of involved fire hydrants that provide water loss when the network FEWS damaged, the total number of fire hydrants involved network FEWS. With respect to the models of analyzed ring networks FEWS disclosed the structure of the location of water sources (depending on the number of fire hydrants and distances between them), it's provided a mathematical description of each of the considered models. The performance of the proposed models and method of quantitative assessment of the network yield FEWS is demonstrated.

Recommendations are given for further development and practical use of the developed method for the needs of specialists in the field of fire safety. In particular, it is proposed to use the methodology

to design networks of passports FEWS subject to the height differences of the terrain, the amount of FH involved, approximate their locations and characteristics of pumping stations. In the preparation of these passports of networks FEWS it's proposed in a separate Annex to put the calculated yield table real network FEWS based on the expected factors of internal and external negative effects (including damage to sections of pipelines) on the network. In addition, it's proposed to reflect the methodology of calculation of loss networks FEWS in the special supplement to the a set of rules 8.13130.2009.

Keywords: water supply; network external firefighting water supply; fire hydrant; damage of the network; survivability; survivability factor; analysis; passport of network.

REFERENCES

1. Sharovarnikov A. F., Molchanov V. P., Voevoda S. S., Sharovarnikov S. A. *Tusheniye pozharov nefi i nefteproduktov* [Extinguish the fires of oil and petroleum products]. Moscow, Kalan Publ., 2002. 448 p.
2. *Guidelines for the development of plans and cards of fire extinguishing*. Order of Emercom of Russia on 01.03.2013 No. 43-956-18. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/499028650> (Accessed 30 March 2016) (in Russian).
3. Särqvist S., Holmstedt G. Correlation between firefighting operation and fire area: analysis of statistics. *Fire Technology*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 109–130. DOI: 10.1023/A:1015450308130.
4. Adrian R., Cimolino U., Fuchs M., Südmersen J., Volkmar G. *Fire fighting in the interior attack*. Ecomed Sicherheit GmbH, 2013. 304 p.
5. Povzik Ya. S. *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara* [Guide the supervisor of the fire fighting]. Moscow, ZAO "Spetstekhnika" Publ., 2004. 361 p.
6. Tarantsev A. A., Pivovarov N. Yu. Raschetnaya otsenka vodootdachi tupikovykh setey naruzhnogo protivopozharnogo vodosnabzheniya [Design estimate of water runoff in deadlock networks of an external fire-prevention water supply system]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 9, pp. 73–78.
7. Pivovarov N. Yu., Tarantsev A. A. Modelirovaniye vodootdachi koltsevykh setey naruzhnogo protivopozharnogo vodoprovoda [Modeling water loss of ring networks external fire water supply]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 12, pp. 69–75.
8. Marshall V. *Major chemical hazards*. Chichester, Ellis Horwood Ltd., 1987 (Russ. ed.: Marshall V. Osnovnyye opasnosti khimicheskikh proizvodstv. Moscow, Mir Publ., 1989. 672 p.).
9. Khramenkov S. V., Aliferenkov A. D., Primin O. G. *Truby iz vysokoprochnogo chuguna dlya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: monografiya* [Pipes of ductile iron for water and wastewater systems. Monography]. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2015. 192 p.
10. Reynolds O. On rolling-friction. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1876, vol. 166, pt. 1, pp. 155–177.
11. Chugaev R. R. *Gidravlika (tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti)* [Hydraulics (engineering fluid mechanics)]. Leningrad, Energoizdat, 1982. 672 p.
12. Idelchik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 672 p.
13. Ochkov V. F. *Mathcad 14 dlya studentov, inzhenerov i konstruktorov* [Mathcad 14 for students, engineers and designers]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2007. 368 p.
14. *Set of rules 8.13130.2009. Systems of fire protection. Location of fire service divisions. Procedure and methods of determination*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2009 (in Russian).
15. NFPA 1142. Standard on water supplies for suburban and rural fire fighting. National Fire Protection Association, 2012. Available at: <http://www.indabook.org/d/NFPA-National-Fire-Protection-Association.pdf> (Accessed 29 March 2016).

For citation: Tarantsev A. A., Pivovarov N. Yu. Analiz vodootdachi koltsevoy seti naruzhnogo protivopozharnogo vodoprovoda s uchetom povrezhdeniy truboprovodov [Analysis of the yield of ring networks of outdoor fire water supply system with consideration of pipeline damage]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 6, pp. 66–78. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.66-78.