

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НАРУЖНОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОСТАТОЧНОСТИ ВОДООТДАЧИ ПРИ ТУШЕНИИ КРУПНЫХ ПОЖАРОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н.Ю. Пивоваров.

Главное управление МЧС России по Новосибирской области.

А.А. Таранцев, доктор технических наук, профессор.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Изложены проблемы оценки и обеспечения достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности. Рассмотрено применение численных методов моделирования систем наружного противопожарного водоснабжения для оценки и обеспечения достаточности водоснабжения при тушении крупных пожаров на предприятиях нефтехимической промышленности.

Ключевые слова: система наружного противопожарного водоснабжения, тушение пожаров, моделирование, водоотдача, пожарный гидрант, планирование

MODELING SYSTEMS OF EXTERNAL FIRE-PREVENTION WATER SUPPLY FOR ASSESSING THE SUFFICIENCY WATER LOSS IN EXTINGUISHING FIRES AT THE ENTERPRISES OF PETROCHEMICAL INDUSTRY

N. Y. Pivovarov. Central administrative board of EMERCOM of Russia on Novosibirsk.

A.A. Tarantsev. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Problems of an estimation and support of sufficiency of water supply at extinguishing of large fires at the factories of the petrochemical industry. Application of numerical methods of modeling of systems of external fire-prevention water supply for an estimation and support of sufficiency of water supply at extinguishing of large fires at the factories of the petrochemical industry.

Keywords: system of external fire-prevention water supply, extinguishing of fires, modeling, water return, a fire hydrant, planning

По статистическим данным Межгосударственного совета стран СНГ по промышленной безопасности за 2012 г., на предприятиях нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности в Российской Федерации произошло 18 аварий с экономическим ущербом 238 860 тыс. дол. США и количеством травмированных – 14 человек (в том числе два со смертельным исходом) [1]. Аварии, связанные с взрывом технологического оборудования (ТО) и технологических установок (ТУ), на данных предприятиях в большинстве случаев сопровождаются возникновением крупных пожаров, для ликвидации которых требуется большое количество пожарной техники, личного состава Государственной противопожарной службы и огнетушащих веществ (ОТВ) (рис. 1).



Рис. 1. Авария в г. Буденновске на нефтехимическом предприятии крупнейшей российской частной нефтяной компании ОАО «ЛУКОЙЛ» – «Ставролене»

Основным ОТВ при тушении пожаров на предприятиях нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности является воздушно-механическая пена (ВМП) средней кратности, подаваемая на поверхность горючей жидкости [2]. 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 наружного противопожарного водоснабжения (НППВ). При разработке документов предварительного планирования действий по тушению пожаров на данные предприятия, в них рассчитываются основные показатели, характеризующие условия возможной локализации и дальнейшей ликвидации возможного пожара, одним из которых является расход огнетушащего вещества. Одним из основных условий локализации пожара является следующее [2]:

$$Q_{\phi} \geq Q_{mp},$$

где Q_{ϕ} – фактический расход ОТВ; Q_{mp} – требуемый расход ОТВ.

Требуемый расход ОТВ (Q_{mp}) рассчитывается по формуле [2]:

$$Q_{mp} = I_{mp} \cdot P_m,$$

где I_{mp} – требуемая интенсивность подачи огнетушащего вещества, л/(с · м²), л/(с · м), л/(с · м³), данная величина находится по справочным данным [3]; P_m – параметр тушения, на который осуществляется подача огнетушащего вещества (S_m, V_m, P_m), величины параметров тушения, в зависимости от геометрической формы пожара, рассчитываются по известным формулам, которые можно найти в любом учебнике пожарной тактики.

Фактический расход огнетушащего вещества (Q_{ϕ}) определяется следующим образом [2]:

$$Q_{\phi} = N_{cm} \cdot q_{cm},$$

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_{ϕ} сравнивают с величиной водоотдачи водопроводной сети (ВС) $Q_{вс}$, используя данные табл. 1, которую можно найти в любом издании справочника руководителя тушения пожара [3].

Таблица 1. Водоотдача водопроводных сетей

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

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 табл. 1 не дает полной информации для комплексной оценки водоотдачи ВС и не учитывает такие параметры, как количество задействованных пожарных гидрантов (ПГ), удаленность ПГ от насосной станции (НС) и от соседних ПГ, перепады высот местности и напорно-расходные характеристики (НРХ) применяемых насосов. Для уточнения данных параметров предлагается использовать моделирование системы НППВ [4].

Для моделирования напорного течения в трубопроводе приняты следующие допущения [5]:

- а) жидкость несжимаемая, обладающая плотностью ρ и кинематической вязкостью ν ;
- б) потери давления из-за трения при течении подчинены закону Дарси-Вейсбаха:

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

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

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

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

где n – количество отрезков трубопровода, образующих рассматриваемый участок; ρ – плотность перекачиваемой жидкости ($\rho_{\text{воды}} \approx 1000 \text{ кг/м}^3$); $\xi_{ли}$ – коэффициент линейного сопротивления на i -м отрезке трубопровода; $\xi_{ми}$ – сумма коэффициентов местных

сопротивлений на i -м отрезке трубопровода; F_i – площадь проходного сечения трубопровода на i -м отрезке трубопровода, м^2 .

Коэффициент линейного сопротивления для круглых труб находится по выражению:

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

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

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

где $K_{\text{э}}$ – абсолютная эквивалентная шероховатость стенок для труб из различных материалов;

в) известны НРХ источников жидкости (рис. 2). 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: $Q=180 \text{ м}^3/\text{ч}$; $H=80 \text{ м.в.ст.}$; $N=30 \text{ кВт}$; $n=2900 \text{ об/мин}$. 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 (1) и характеристики центробежного насоса вида:

$$p(Q) = p_n - A_n Q,$$

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

д) источник и линия расположены на одинаковых уровнях, а линия представляет собой замкнутый горизонтальный в плане трубопровод с N отводами (кольцевую сеть).

Моделирование проводилось на примере реальной наружной кольцевой водопроводной сети Санкт-Петербурга по улице Пархоменко [6] диаметром 150 мм (рис. 3) при условиях включения одного, двух и трех ПГ.

Определяем коэффициент гидравлического сопротивления ПГ по формуле (2). При диаметре труб $d=150 \text{ мм}$ площадь сечения трубопровода:

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

Коэффициент местного сопротивления для подземного пожарного гидранта на наружной водопроводной сети ($\alpha=90^\circ$) по справочнику [7] $\xi_m=1,2$.

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

$$A = 0,5 \rho \sum_{i=1}^n \frac{\xi_{\lambda i} + \xi_{m i}}{F_i^2} = 0,5 \cdot 1000 \frac{1,2}{0,018^2} = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^7.$$

Определяем линейные потери на участке трубопровода по формуле (3). Коэффициент сопротивления трению на единице длины λ рассчитывается по формуле (4). Из таблицы V.1 [8] для старых стальных сварных труб абсолютная эквивалентная шероховатость $K_{\text{э}}=1$.

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

$\xi_{ли} = \frac{0,03L}{0,15} = 0,2L$. Таким образом, подставив полученные значения в (2), получим формулу коэффициента сопротивления участка при диаметре трубопровода 150 мм:

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

Для моделирования и расчета водоотдачи водопроводной сети коэффициенты сопротивления участков рассчитывались по формуле (5) с учетом реальных расстояний, указанных на схеме (рис. 3).

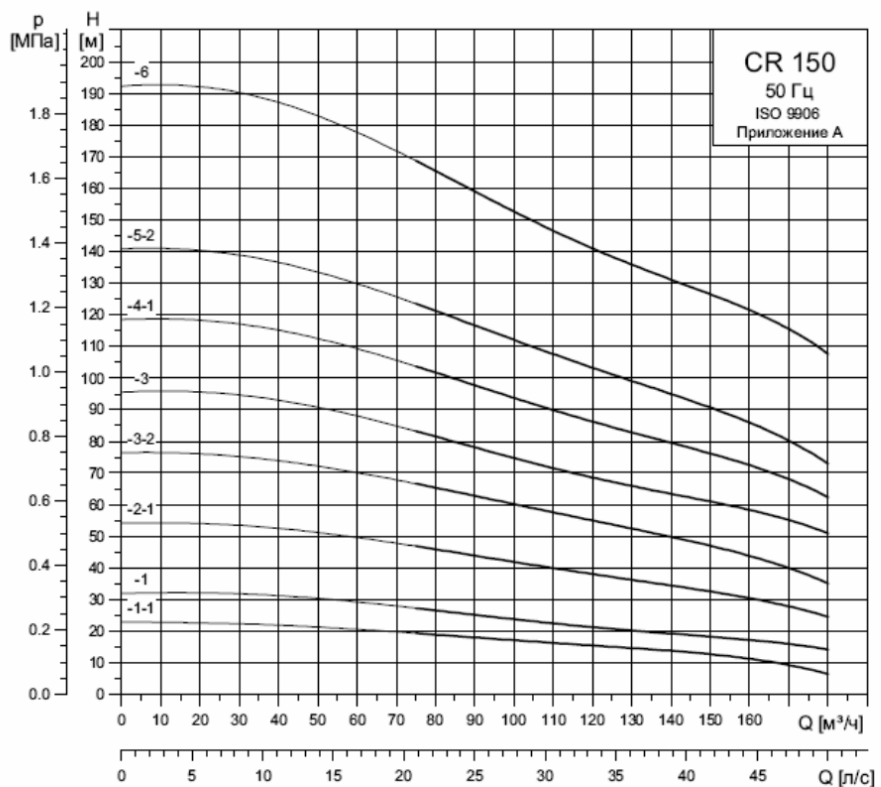


Рис. 2. Напорно-расходные характеристики насоса Grundfos CR 150-3-2

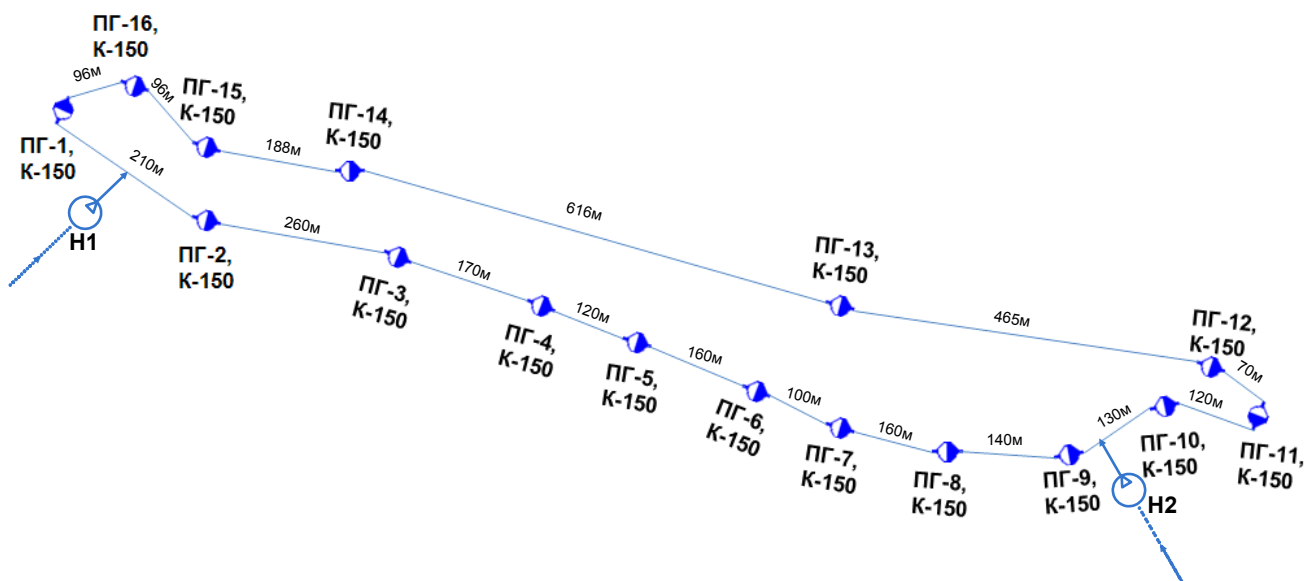


Рис. 3. Схема расположения пожарных гидрантов на наружной водопроводной сети по ул. Пархоменко (Санкт-Петербург)

Таблица 2. Моделирование водоотдачи наружной кольцевой ВС при условии включения 1, 2 и 3 ПГ

№ п/п	Гидравлическая схема	Исходные уравнения	Уравнения для расчётов
1		$p_0 = p_{к1} - A_{к1} q_{01}^2$ $p_1 = A_{тп} (q_{01} + q_{21})^2$ $p_2 = p_{к2} - A_{к2} q_{21}^2$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2$ $p_2 - p_1 = A_{21} q_{21}^2$	$p_{к1} - q_{01}^2 (A_{к1} + A_{01}) = A_{к2} (q_{01} + q_{21})^2$ $p_{к2} - q_{21}^2 (A_{к2} + A_{21}) = A_{к2} (q_{01} + q_{21})^2$
2		$p_0 = p_{к1} - A_{к1} (q_{01} + q_{02})^2$ $p_1 = A_{тп} (q_{01} + q_{31})^2$ $p_2 = A_{тп} (q_{02} + q_{32})^2$ $p_3 = p_{к2} - A_{к2} (q_{31} + q_{32})^2$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2$ $p_3 - p_1 = A_{31} q_{31}^2$ $p_3 - p_2 = A_{32} q_{32}^2$	$p_{к1} - A_{к1} (q_{01} + q_{02})^2 - A_{тп} (q_{01} + q_{31})^2 - A_{01} q_{01}^2 = 0$ $A_{тп} (q_{02} + q_{32})^2 - A_{тп} (q_{01} + q_{31})^2 - A_{02} q_{02}^2 = 0$ $p_{к2} - A_{к2} (q_{31} + q_{32})^2 - A_{тп} (q_{01} + q_{31})^2 - A_{31} q_{31}^2 = 0$ $A_{тп} (q_{02} + q_{32})^2 - A_{тп} (q_{01} + q_{31})^2 = A_{31} q_{31}^2 - A_{32} q_{32}^2$
3		$p_0 = p_{к1} - A_{к1} (q_{01} + q_{02})^2$ $p_1 = A_{тп} (q_{01} + q_{41})^2$ $p_2 = A_{тп} (q_{02} - q_{23})^2$ $p_3 = A_{тп} (q_{23} + q_{43})^2$ $p_4 = p_{к2} - A_{к2} (q_{41} + q_{43})^2$ $p_0 - p_1 = A_{01} q_{01}^2$ $p_0 - p_2 = A_{02} q_{02}^2$ $p_2 - p_3 = A_{23} q_{23}^2$ $p_4 - p_1 = A_{41} q_{41}^2$ $p_4 - p_3 = A_{43} q_{43}^2$	$p_{к1} - A_{к1} (q_{01} + q_{02})^2 - A_{тп} (q_{01} + q_{41})^2 - A_{01} q_{01}^2 = 0$ $p_{к1} - A_{к1} (q_{01} + q_{02})^2 - A_{тп} (q_{02} - q_{23})^2 - A_{02} q_{02}^2 = 0$ $A_{тп} (q_{02} - q_{23})^2 - A_{тп} (q_{23} + q_{43})^2 - A_{23} q_{23}^2 = 0$ $p_{к2} - A_{к2} (q_{41} + q_{43})^2 - A_{тп} (q_{01} + q_{41})^2 - A_{41} q_{41}^2 = 0$ $p_{к2} - A_{к2} (q_{41} + q_{43})^2 - A_{тп} (q_{23} + q_{43})^2 - A_{43} q_{43}^2 = 0$

При решении систем уравнений из табл. 2 с помощью математического пакета MathCad14 при различных параметрах подачи насосов были получены значения, представленные в табл. 3. В качестве примера приводится результат расчета при максимальной подаче насосов:

- при включении одного ПГ результирующий расход $Q_1 = q_{01} + q_{21} = 0,099 \text{ м}^3/\text{с} = 99 \text{ л/с}$;
- при включении двух ПГ результирующий расход $Q_1 = q_{01} + q_{31} = 0,090 \text{ м}^3/\text{с} = 90 \text{ л/с}$;
 $Q_2 = q_{02} + q_{32} = 0,030 \text{ м}^3/\text{с} = 30 \text{ л/с}$;
- при включении трех ПГ результирующий расход $Q_1 = q_{01} + q_{41} = 0,059 \text{ м}^3/\text{с} = 59 \text{ л/с}$;
 $Q_2 = q_{02} - q_{23} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с} = 35 \text{ л/с}$; $Q_3 = q_{23} + q_{43} = 0,034 \text{ м}^3/\text{с} = 34 \text{ л/с}$.

По аналогичной методике были рассчитаны наружные кольцевые водопроводные сети диаметрами 100 мм и 200 мм из справочника [6] при количестве задействованных ПГ 1–3 и различных параметрах подачи насосов. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3. Водоотдача наружных кольцевых ВС при количестве задействованных ПГ 1–3

Напор в ВС, м. вод.столба	Количество задействованных ПГ	Водоотдача ВС, л/с, при диаметре трубы, мм		
		100	150	200
10	1ПГ	21	35	50
	2ПГ	20 5	32 11	38 14
	3ПГ	16 10 9	21 13 12	22 15 14
20	1ПГ	30	49	71
	2ПГ	28 7	45 15	53 20
	3ПГ	23 15 12	30 18 17	31 21 20
30	1ПГ	37	61	86
	2ПГ	34 8	56 18	65 24
	3ПГ	28 18 15	36 22 21	38 26 25
40	1ПГ	42	70	100
	2ПГ	40 10	64 21	75 28
	3ПГ	32 20 17	45 25 24	44 30 29
50	1ПГ	47	78	112
	2ПГ	44 11	72 24	84 31
	3ПГ	36 23 19	47 28 27	49 34 33
60	1ПГ	52	86	122
	2ПГ	49 12	79 26	92 34
	3ПГ	39 25 21	51 31 29	54 37 36
70	1ПГ	56	92	132
	2ПГ	53 13	85 28	99 37
	3ПГ	42 27 23	55 33 32	58 40 39
80	1ПГ	60	99	141
	2ПГ	56 14	90 30	106 40
	3ПГ	45 29 25	59 35 34	62 43 42

Сравнивая полученные значения (табл. 3) с существующими табличными данными в справочниках руководителей тушения пожаров (табл. 2), нетрудно заметить, что значения водоотдачи наружных кольцевых водопроводных сетей диаметрами 100 мм, 150 мм, и 200 мм при включении двух и более пожарных гидрантов, полученные при использовании методики моделирования сетей наружного противопожарного водоснабжения, существенно отличаются от табличных данных, представленных в справочниках руководителей тушения пожаров. Это значит, что их использование может привести руководителя тушения пожара на практике к критической ошибке при расчете достаточности водоснабжения на крупном пожаре, и, следовательно, к крупным материальным потерям, а возможно, и человеческим жертвам, хотя теоретически водоотдачи должно хватить и на тушение, и на защиту.

В качестве выводов могут быть предложены следующие рекомендации:

– при составлении документов предварительного планирования на объекты, требующие на тушение и защиту больших расходов воды, применять уточненный расчет по предложенной методике;

– для каждой ВС рассчитать водоотдачу при различных вариантах задействования ПГ по предложенной методике и учитывать данные расчеты при ведении действий по тушению пожаров;

– при тушении пожаров на данных объектах с использованием гидрантов более одного, если случается критическая ситуация, связанная с нехваткой водоотдачи, разгружать ВС, используя ближайшие гидранты с соседней ВС.

Литература

1. Межгосударственный совет стран СНГ по промышленной безопасности: [сайт]. URL: http://www.mspbsng.org/stat_accident (дата обращения: 15.09.2013).

2. Решетов А.П., Башаричев А.В., Ключ В.В. Пожарная тактика: учеб. пособие. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2010.

3. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. М.: Стройиздат, 1987.

4. Таранцев А.А., Пивоваров Н.Ю. Расчетная оценка водоотдачи тупиковых сетей наружного противопожарного водоснабжения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 9 (21).

5. Груданова О.В., Таранцев А.А., Яркин В.В. О задачах напорного движения жидкости по горизонтальному трубопроводу с отводами // Вест. С.-Петербург. ин-та ГПС МЧС России. 2005. № 2 (9).

6. Белорусов В.Г., Михайловский А.А., Нечаев А.А. Справочник противопожарного водоснабжения г. Санкт-Петербурга. СПб., 2000.

7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992.

8. Цыбин Л.А., Шанаев И.Ф. Гидравлика и насосы. М.: Высшая школа, 1976.