

УДК 532.595.2

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОУДАРА В НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ

Кравец А.М., ассистент, Коренькова Т.В., к.т.н., доц.

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

E-mail: saue@polytech.poltava.ua

Виконано порівняльний аналіз методів визначення параметрів гідроудару в насосних станціях. Отримано параметри гідроудару в насосному комплексі при керуванні засувкою в мережі споживача та різкому спрацюванню зворотного клапану на базі аналітичного і графоаналітичного методів.

Ключові слова: гідроудар, засувка, гідроклапан, темп керування, підвищення напору.

The comparative analysis of methods of determination of hydraulic impact parameters in pump stations is executed. Parameters of hydraulic impact in a pump complex are received when controlling the latch in a consumer network and sharp response of the check valve on the basis of analytical and graphic-analytical methods.

Key words: hydraulic impact, latch, hydraulic valve, control rate, pressure increasing.

Введение. Работа насосных станций (НС) систем коммунального водоснабжения, промышленного водоотведения, шахтного водоотлива характеризуется высокой аварийностью в пусковых, регулировочных и нестационарных режимах работы технологического оборудования. Это обусловлено превышением нормативного ресурса работы насосных агрегатов (НА) и трубопроводных сетей, с одной стороны, и неэффективностью используемых методов регулирования, средств гидрозащиты, с другой.

Основными причинами возникновения аварийных ситуаций являются [1, 2]:

- несоблюдение темпа управления запорно-регулирующей трубопроводной арматурой при пусках/остановках и регулировании производительности или напора НА;

- резкое изменение режима работы потребителя;
- внезапное отключение электропитания НС (при этом в технологических схемах НС с обратными клапанами в напорных патрубках НА происходит резкое их схлопывание).

В указанных выше случаях наблюдается значительный рост динамических нагрузок в гидросистеме, приводящий к гидравлическим ударам, пульсациям и резким броскам давления, повышенным вибрациям стенок трубопроводной сети, проточного тракта НА, разрушению трубопроводной арматуры [1].

При резком срабатывании гидрозащитной арматуры в начальный момент времени у источника возмущения (задвиги или обратного клапана) возникает скачкообразное повышение напора $\Delta H = (c/g) v_0$, распространяющееся по длине L трубопровода в виде волны повышенного давления с постоянной по величине скоростью c . На рис. 1 приведена технологическая схема идеальной гидротранспортной системы (без учета потерь на трение, образования кавитационных разрывов сплошности потока, динамических свойств трубопроводной арматуры) с регулировочной задвижкой в сети потребителя, резкое управление которой приводит к возникновению гидроудара в трубопроводной системе в виде волн повышенного и пониженного давления.

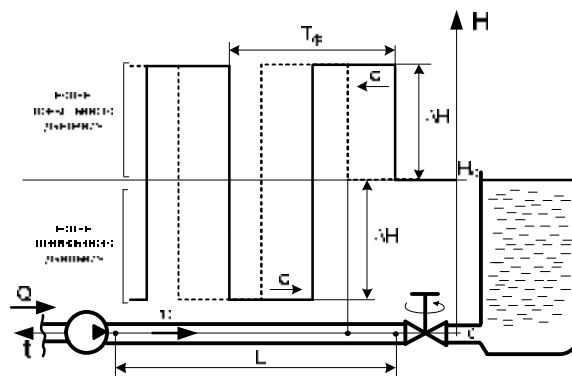


Рисунок 1 – Распространение волн гидроудара в трубопроводной сети

При подходе ударной волны к насосу, резервуару или месту присоединения к трубопроводу большего диаметра, тупику и т.п. она отражается, и с той же скоростью возвращается к источнику возмущения в виде волны пониженного давления ΔH . Распространение ударной волны от источника возмущения до места отражения и обратно происходит периодически через время, равное фазе гидроудара $T_{\phi} = 2L/c$. В реальных трубопроводах такой процесс имеет затухающий характер из-за наличия потерь на трение – в каждой последующей фазе гидроудара величина ΔH изменяется. При этом скорость распространения ударной волны не является постоянной величиной и зависит от степени сжимаемости жидкости, жесткости стенок трубопровода, наличия нерастворенного воздуха в жидкости и изменения давления в трубопроводной сети.

Таким образом, переходные процессы, связанные с протеканием гидроудара в гидравлической сети, носят волновой характер. Резкие перепады давления возникают в каждой точке трубопровода, и зависят не только от времени, но и протяженности трубопровода, величины статического напора, свойств перекачиваемой среды.

Анализ предыдущих исследований. Для иссле-

дования переходных процессов в гидравлической системе необходимо располагать методами, позволяющими определять на различных участках трубопровода в требуемые моменты времени параметры гидравлического удара, возникающего при различного рода возмущающих воздействиях.

В гидродинамике распространение волн гидравлического удара описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных на базе уравнений неразрывности потока и количества движения жидкости, которые не имеют точного аналитического решения. Одни подходы не учитывают потери на трение и местные гидравлические сопротивления, кавитационные явления, изменение скорости движения ударной волны, инерционные свойства насосов, задвижек, обратных клапанов и т.п. [3-7]; другие – ориентируются на использование методов операционного и численного решения [8-11],

которые позволяют исследовать явление кавитации в трубопроводной сети, учитывать реальные параметры сложных разветвленных трубопроводов и т.д. Однако, в работах [3-11], не касаются вопросов разработки путей снижения и способов управления динамическими нагрузками в НС, возникающими при различного рода аварийных ситуациях.

Цель работы – анализ методов определения параметров гидроудара в насосных комплексах и оценка влияния интенсивности управления трубопроводной арматурой на гидродинамические процессы в коммуникационной сети.

Материал и результаты исследования. Анализ [3-11] позволил выделить известные подходы определения параметров гидроудара в две группы – аналитические и графо-аналитические методы, сравнительная характеристика которых приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов определения параметров гидроудара

Наименование метода	Принятые допущения						Возможности метода			
	Потери на трение в трубопроводе	Наличие нерастворенного воздуха в жидкости	Образование кавитационных разрывов сплошности потока жидкости	Влияние работы «пассивных» устройств	Влияние работы «активных и реактивных» устройств	Распределение потерь напора по длине трубопроводной сети	Определение параметров переходного процесса в произвольной точке трубопровода	Определение параметров переходного процесса в произвольные моменты времени	Учет параметров работы гидравлических устройств	Расчет сложных гидравлических систем
Аналитические методы										
Классическая теория Жуковского	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-
Цепные уравнения Алливи	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+
Аналитическое решение уравнений неразрывности и количества движения	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+
Численное решение уравнений неразрывности и количества движения	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Графо-аналитические методы										
Метод Шнидера-Бержерона	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-
Метод Ангуса	+	-	+	+	+	+	+	-	-	+

В основе аналитического определения параметров гидроудара в гидротранспортных системах лежат волновые дифференциальные уравнения в частных производных [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} - v \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\ E \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial t} - v \frac{\partial p}{\partial x}; \\ c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \end{cases} \quad (1)$$

Для учета упругости и сжимаемости жидкости, упругости материала стенок трубопроводов, потерь напора на трение и местных гидравлических сопротивлений, неоднородности потока предложены уравнения неразрывности и количества движения, описывающие распространение волн гидравлического удара в трубопроводе в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial z}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\lambda v |v|}{2d} = 0; \\ c = \sqrt{\frac{E'}{\rho'}}; \frac{1}{E'} = \frac{1-\beta}{K} + \frac{\beta}{p} + \frac{d}{\delta E_0}, \end{cases} \quad (2)$$

где в (1), (2): p - абсолютное давление в трубопроводе, Па; v - скорость течения жидкости в трубопроводе, м/с; t - время, с; x - координата вдоль оси трубопровода, м; ρ - плотность жидкости, кг/м³;

$$E = \frac{1}{\left(\frac{1}{E'} + \frac{d}{\delta E''} \right)}$$

- приведенный модуль упругости

трубопровода, кг/см²; E - модуль объемной упругости жидкости, кг/см²; E'' - модуль упругости материала трубы, кг/см²; d - внутренний диаметр трубопровода, м; δ - толщина стенок трубопровода, м; c - скорость распространения ударной волны, м/с;

$H = \frac{P}{\rho g} + z$ - напор, м; z - геодезическая отметка, м; g

- ускорение свободного падения, м/с²; λ - коэффициент, учитывающий трение по длине трубопровода; β - объемная доля нерастворенного воздуха в жидкости; ρ' - плотность смеси жидкость-воздух, кг/м³; E' - модуль Юнга для смеси вода-воздух с поправкой на упругость трубы; K - модуль упругости жидкости при отсутствии нерастворенного воздуха; E_0 - модуль Юнга материала трубы.

Аналитические методы определения параметров гидроудара нашли отражение в работах:

- Жуковского Н.Е., базирующегося на предположениях об отсутствии трения в трубопроводе, постоянстве скорости распространения ударной волны, отсутствии нерастворенного воздуха в жидкости и кавитационных разрывов сплошности [3];

- Аллиеви Л., развившего теорию Жуковского для неидеальных трубопроводов с учетом потерь на трение [4];

- Чарного И.А., предложившего приведение системы (2) к форме линеаризованных телеграфных уравнений и их решение с помощью различных методов Фурье, операционного исчисления и др. [8];

- Лямаева Б.Н., Вишневого К.П., Фокса Д.А., использующих для решения системы (2) численные методы на базе конечно-разностных уравнений, метода характеристик, позволяющих учитывать потери напора в трубопроводах на трение и местные гидравлические сопротивления, возможность образования кавитационных разрывов сплошности, наличие в воде нерастворенного воздуха, динамические свойства свойства гидрозащитной трубопроводной арматуры [9-11].

Графоаналитические методы, изложенные в работах Бержерона, Шнидера, Ангуса, базируются на построении волновых характеристик, отражающих темп нарастания и величину давления в различных узлах гидросистемы [5-7].

Авторами определены параметры гидроудара в насосном комплексе (рис. 2) с помощью аналитического и графоаналитического методов при разных темпах управления задвижкой в сети потребителя и автоматическом схлопывании обратного клапана при внезапном отключении электроэнергии. При этом учитываются потери напора на трение $\Delta h_{тр}$, гидравлические свойства и темп закрытия арматуры, параметры гидросети (статический напор, гидравлическое сопротивление), напорно-расходная характеристика насоса.

В качестве объекта исследований взята НС Власовского водозабора системы водоснабжения г. Кременчуга, которая включает два центробежных насоса, трубопроводную сеть, приемный резервуар, систему запорно-регулирующей арматуры. В работе постоянно находится основной НА, в часы пик включается дополнительный насос. Паспортные параметры основного НА: номинальная производительность $Q_n=4000$ м³/ч, напор $H_n=95$ м, мощность на валу $P=630$ кВт, частота вращения $n=750$ об/мин. Параметры трубопроводной сети: длина $L=12.7$ км, диаметр $d=1000$ мм, статический перепад $H_{ст}=65$ м.

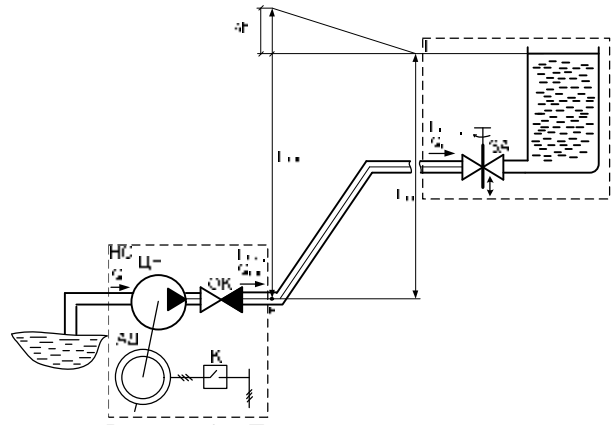


Рисунок 2 – Технологическая схема насосного комплекса:

ЦН – центробежный насос; ЗА – запорно-регулирующая арматура; ОК – обратный клапан; АД – асинхронный двигатель; П – потребитель; К – контактор

Темп управления задвижкой описывается выражением вида:

$$t = (1 - \beta)^n t_{закр}, \quad (3)$$

где β - относительная степень открытия задвижки; n - коэффициент интенсивности управления арматурой; $t_{закр}$ - время полного закрытия арматуры [1].

Кривые повышения напора у задвижки в каждой фазе гидроудара представлены рекуррентными выражениями Аллиевии:

$$\Delta H_k = 2\Delta h_{тр} \left[\left[j - \left(\sum_{i=1}^{k-1} \Delta H_i / \Delta h_{тр} \right) + (j\phi_k / \phi_0)^2 \right] - (j\phi_k / \phi_0) \sqrt{1 + 2 \left[j - \sum_{i=1}^{k-1} \Delta H_i / \Delta h_{тр} \right] + (j\phi_k / \phi_0)^2} \right], \quad (4)$$

где $j = v_{0c} / (2g\Delta h_{тр})$ - ударный параметр трубопровода; v_0 - скорость течения жидкости в трубопроводе до закрытия арматуры, м/с; $\Delta h_{тр}$ - потери напора на трение по длине трубопровода, м; g - ускорение свободного падения, м/с²; $\phi_{0,k} = 1 / \sqrt{\xi_{тр} + \xi}$ - коэффициенты скорости трубопроводной системы с арматурой до начала закрытия и при данном закрытии соответственно; $\xi_{тр}$ - коэффициент гидравлического сопротивления трубопроводной системы.

Из графиков (рис. 3, а) видно, что для значений коэффициента интенсивности управления задвижкой $n=3$ и $n=6$ величина повышения давления перед задвижкой (точки A_1-A_6 , рис. 3, а) в 2.5 и 2 раза превышает номинальное значение напора, соответственно.

Кривые изменения напора в каждой фазе гидроудара (точки B_1-B_5 , A_1-A_6 рис. 3, б)), полученные для тех же темпов управления графоаналитическим методом, строятся пересечением волновых характеристик гидросистемы с напорно-расходной характеристикой насоса и суммарной характеристикой трубопроводной сети для различных значений степени открытия β арматуры (рис. 3, б)).

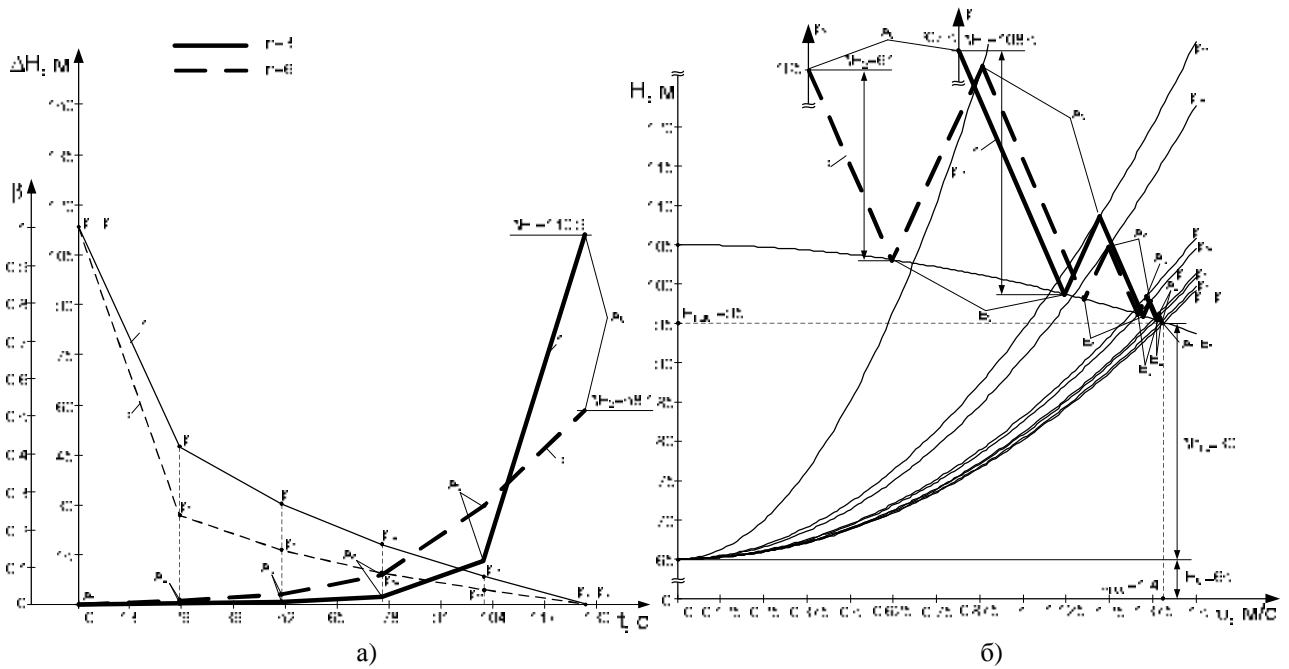


Рисунок 3 – Определение параметров гидроудара в насосном комплексе на базе аналитического а) и графоаналитического методов б) при закрытии задвижки в сети потребителя с различным коэффициентом интенсивности управления p

С помощью графоаналитического метода рассмотрены волновые характеристики в трубопроводе при внезапном отключении электроэнергии НА и резком схлопывании обратного клапана в его на-

порном трубопроводе с учетом образования кавитационного разрыва сплошности потока (рис. 4, кривая 2) и без него (рис. 4, кривая 1).

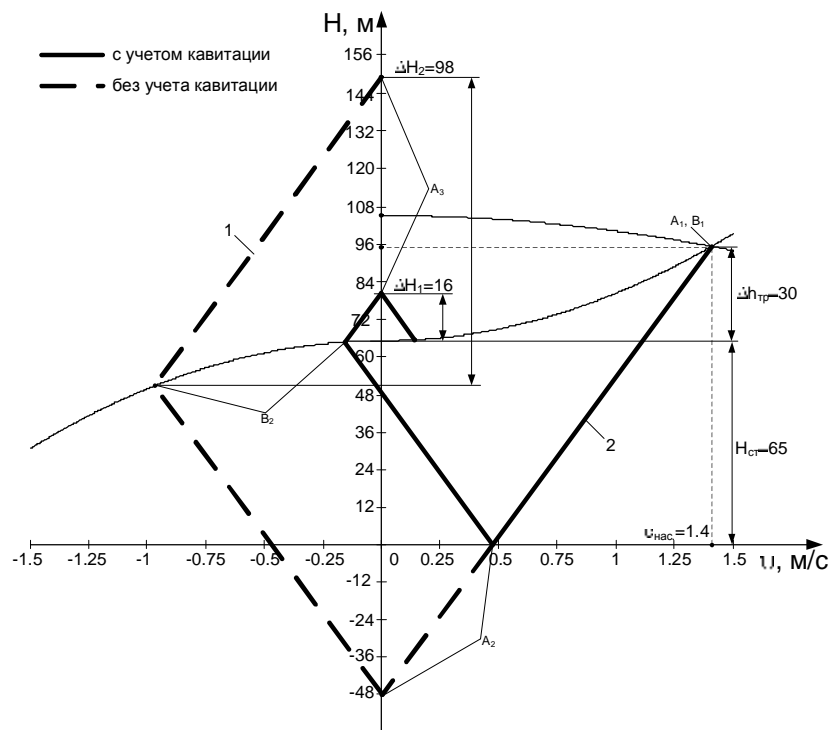


Рисунок 4 – Определение параметров гидроудара в насосном комплексе на базе графоаналитического метода при резком схлопывании обратного клапана в напорном патрубке насоса

Из анализа графиков (рис. 4) следует, что при внезапном отключении электроэнергии НА под воз-

действием статического напора $H_{ст}=65$ м рабочая среда перемещается в обратном направлении (зона

отрицательных скоростей). В напорном патрубке происходит резкое срабатывание обратного клапана. При этом в трубопроводной сети возникает прямой гидроудар, который при пренебрежении явлением кавитации (рис. 4, кривая 1) составляет $\Delta H_1=98$ м. В реальных условиях при схлопывании обратного клапана волна пониженного напора уменьшает давление в напорном патрубке до давления насыщенных паров, что приводит к возникновению кавитационных процессов и разрыву сплошности потока. Вследствие этого, увеличивается время торможения и последующего обратного движения столба жидкости; возникающая при этом воздушная пробка смягчат величину гидроудара (рис. 4, кривая 2) –

$\Delta H_2=16$ м, что в 6 раз меньше, чем в предыдущем случае.

Значения динамических нагрузок в насосном комплексе при возникновении гидроудара в двух рассматриваемых случаях приведены в табл. 2, анализ которой показал, что в аварийные режимы насосных установок, связанные с резким закрытием запорно-регулирующей и гидрозачитной арматуры, характеризуются повышенными бросками давления в трубопроводной магистрали, в 2-3 раза превышающими допустимые значения, что обусловлено низкой управляемостью технологического оборудования насосных комплексов.

Таблица 2 – Динамические нагрузки в насосном комплексе при аварийных режимах работы

Причина возникновения гидроудара		Величина гидроудара ΔH , м	
		Аналитический метод	Графоаналитический метод
Закрытие задвижки в сети потребителя	n=3	110.9	108.5
	n=6	58.1	61
Схлопывание обратного клапана в напорном патрубке насоса	без кавитации	-	98
	с кавитацией	-	16

Выводы. Выполненные исследования показали, что методы определения параметров гидроудара с использованием уравнений Аллиевии, волновых характеристик Бержерона, учитывающие реальные свойства насосного агрегата, гидросети, могут быть использованы для определения динамических нагрузок в насосных комплексах в аварийных режимах работы.

Из анализа полученных параметров гидроудара видно, что при различных темпах управления задвижкой превышение напора ΔH зависит от коэффициента интенсивности управления n запорной арматуры – увеличение значения n приводит к снижению величины гидроудара в насосном комплексе. Опасным по динамическим нагрузкам является случай резкого схлопывания обратного клапана в выходном коллекторе насосной станции – величина ΔH в 6-7 раз выше при наличии разрыва сплошности потока и в 1.1 раза при его отсутствии. Таким образом, кавитационные полости в трубопроводе демпфируют повышенные броски давления в коммуникационной сети, что позволяет управлять развитием волновых процессов в гидротранспортной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравец А.М., Коренькова Т.В. Особенности динамических режимов в гидротранспортных системах с управляемой трубопроводной арматурой // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 3(44). Ч. 1. – Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 162-167.
 2. Коренькова Т.В., Кравец А.М. О задаче управления динамическими нагрузками в гидротранс-

портных комплексах при аварийных режимах // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. - Вип. 3(39). - Кременчук: КДПУ, 2006. – С. 23-27.

3. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – М.-Л.: Гос. изд. Технической литературы, 1949. – 700 с.

4. Allievi L. Theoria generate del moto perturbato dell' acqua nei tubi in pressione. Milan 1903 Translated into English by E. E. Hal-mos. The Theory of waterhammer. Am. Soc. Civil Eng., 1925.

5. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети (общий графический метод расчета). – М.: Машгиз, 1962. - 348 с.

6. Schnyder O. Druckstosse in Pumpensteigleitungen. Schweiz Bauztg, 94, JVs 22 and 23, 1929.

7. Angus R.W. Waterhammer in pipes, including those supplied by centrifugal pumps; graphical treatment. Proc. Inst. Mech. Eng., p. 136 and 245, 1937.

8. Чарный И.А. Неустойчивое движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296с.

9. Лямаев Б.Ф. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. Методы расчета на ЭВМ. – Л.: Машиностроение, 1978. - 192 с.

10. Вишневицкий К.П. Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986. – 135с.

11. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустойчивого течения в трубопроводах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248с.

Стаття надійшла 10.04.2008 р.
 Рекомендована до друку д.т.н., проф.
 Родькіним Д.І.