

УДК 681.5.033.2.012

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НАСОСНОМ КОМПЛЕКСЕ С УТЕЧКОЙ В ТРУБОПРОВОДНОЙ СЕТИ

А. В. Шутька

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: aleks_shu@mail.ru

Выполнен анализ переходных процессов напора и гидравлической мощности при внезапном появлении утечки в трубопроводной сети. Предложено применение энергетического критерия с целью определения характера нештатной ситуации. Приведены выражения для определения местонахождения утечки в гидросистеме. Показано, что возникновение утечки в трубопроводной системе сопровождается искажением сигналов напора и гидравлической мощности, появлением в них гармоник высшего порядка.

Ключевые слова: насосный комплекс, переходные процессы, утечка, математическая модель, энергетический критерий.

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У НАСОСНОМУ КОМПЛЕКСІ З ВИТОКОМ У ТРУБОПРОВІДНІЙ МЕРЕЖІ

О. В. Шутька

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: aleks_shu@mail.ru

Виконано аналіз перехідних процесів тиску та гідравлічної потужності при раптовій появі витоку в трубопроводній мережі. Запропоновано застосування енергетичного критерію з метою визначення характеру нештатної ситуації. Приведено вирази для визначення місцезнаходження витоку в гідросистемі. Показано, що виникнення витоку в трубопроводній системі супроводжується спотворенням сигналів тиску та гідравлічної потужності, появою в них гармонік вищого порядку.

Ключові слова: насосний комплекс, перехідні процеси, витік, математична модель, енергетичний критерій.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Трубопроводные сети насосных комплексов (НК) представляют собой сложную разветвленную структуру, включающую горизонтальные и наклонные участки трубопроводов, установленную по длине запорно-регулирующую арматуру, гидроаккумулирующее оборудование и т.п. [1]. Трубопроводные сети систем коммунального хозяйства характеризуются неудовлетворительным техническим состоянием и высокой аварийностью, что приводит к снижению надежности работы систем подачи и распределения воды.

В процессе эксплуатации НК в трубопроводной сети (ТС) возникают нестационарные процессы, обусловленные изменением режимов работы насосных агрегатов (НА), водопотребителей, срабатыванием запорно-регулирующей арматуры и т.д., что сопровождается волновым характером изменения технологических параметров – напора $H(t)$ и производительности $Q(t)$ [2]. В ряде случаев значения $H(t)$ и $Q(t)$ могут превысить предельно допустимые, что приводит к возникновению аварийных режимов – утечкам и порывам трубопровода, кавитационным автоколебаниям, гидравлическим ударам.

К одним из наиболее часто встречающихся нестационарных явлений относятся утечки в трубопроводной сети, обусловленные изношенностью оборудования или несанкционированным подключением к магистрали.

Существующие методы диагностики утечек и неучтенных расходов жидкости в качестве контролируемых параметров используют значения напора, расхода, их производных, а также виброакустические показатели [3–5]. Указанные способы сложны

в реализации, требуют установки дополнительного дорогостоящего оборудования и не дают точного и однозначного результата в определении утечки.

Наличие утечки в трубопроводной сети НК приводит не только к искажению форм сигналов напора и расхода, но и к изменению энергетических показателей: потребляемой и гидравлической мощности, коэффициента полезного действия НК и др. Ввиду того, что гидравлическая мощность $P_g(t)$ определяется произведением напора $H(t)$ и расхода $Q(t)$, ее частотный анализ позволяет выделить большее число информационных признаков, характерных для того или иного аварийного режима.

Применение энергетического критерия (частотного анализа сигналов мгновенной мощности) широко используется в задачах идентификации параметров электродвигателей, диагностики технического состояния электромеханических систем [6, 7].

С учетом сказанного, целью работы является анализ переходных процессов в насосных комплексах с утечкой в трубопроводной сети с применением энергетического критерия.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Водопроводные НК относятся к объектам с распределенными параметрами, где процессы, протекающие в них, можно описать с использованием аппарата телеграфных уравнений [8–10]. Трубопроводная сеть – длинная линия, в которой расход и напор могут непрерывно меняться при переходе от одного сечения к другому, что обусловлено путевыми и сосредоточенными в отдельных точках источниками водопотребления. Для решения телеграфных уравнений используют метод конечных элементов, позволяющий представить ТС конечным числом четырехполосников, причем в пределах участка давле-

ние и производительность принимают постоянными. Для i -го четырехполюсника уравнения напора и расхода имеют вид [8, 9]:

$$\begin{cases} H_i - H_{i-1} + l_0 l_{uch} \frac{dQ_i}{dt} + r_0 l_{uch} Q_i |Q_i| = 0; \\ \frac{dH_i}{dt} + c_0 \frac{1}{l_{uch}} (Q_i - Q_{i-1}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $H_i, Q_i, H_{i-1}, Q_{i-1}$ – напор и производительность на выходе и входе i -го четырехполюсника соответственно; $r_0 = \frac{\lambda}{S^2 d} \frac{1}{2g}$ – приведенное к единице

длины трубопровода гидравлическое сопротивление, c^5/m^2 ; λ – коэффициент гидравлического трения; S – площадь поперечного сечения трубопровода, m^2 ; d – диаметр трубопровода, m ; l_{uch} – длина участка, m ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

$c_0 = \frac{c^2}{Sg}$ – приведенная скорость распространения ударной волны; c – скорость распространения звука в жидкости, m/c ; $l_0 = \frac{1}{Sg}$ – приведенная длина единичного отрезка трубопровода.

Переход от приведенных параметров ТС к удельным выполнен с помощью выражений: $L_0 = l_0 l_{uch}$ – удельная длина трубопровода; $C_0 = c_0 / l_{uch}$ – удельная скорость распространения ударной волны; $R_0 = r_0 l_{uch}$ – удельное сопротивление участка.

Работа насосного агрегата описывается напорно-расходной характеристикой вида [1]:

$$H = A_2 v^2 + B_2 v Q + C_2 Q^2, \quad (2)$$

где A_2, B_2, C_2 – коэффициенты аппроксимации, зависящие от конструктивных особенностей турбомеханизма и определяемые по его паспортной $H-Q$ характеристике; $i = \frac{\omega_i}{\omega_n}$ – относительная скорость вращения рабочего колеса насоса.

Инерционные процессы в насосном агрегате учитываются передаточной функцией вида:

$$W_n(p) = \frac{1}{T_n p + 1}, \quad (3)$$

где $T_n = J_n \frac{w_n}{M_n}$ – постоянная времени насоса; w_n, M_n – номинальные угловая скорость и момент на валу насоса, соответственно; J_n – номинальный момент инерции насоса, kgm^2 .

Момент сопротивления, создаваемый насосом, определяется выражением [1]:

$$M_c = M_0 + (M_n - M_0) (w/w_n)^3, \quad (4)$$

где M_0 – момент холостого хода машины, Nm .

Гидравлическая мощность в системе равна:

$$P_g(t) = \rho g H(t) Q(t), \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости, kg/m^3 ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

На рис. 1,а представлена упрощенная технологическая схема НК, включающая:

- НА с параметрами $H_n=50$ м, $Q_n=0,055$ m^3/c ;
- ТС длиной 2000 м и диаметром 0,24 м;
- потребитель, характеризующийся фиксированным отбором жидкости в конце трубопроводной сети.

На рис. 1,б приведена структурная схема модели НК с блоком формирования утечки в ТС, представляющим утечку постоянной $Q_u = const$ или переменной во времени $Q_u = f(t)$.

Для анализа переходных процессов в НК рассматривались кривые изменения напора и гидравлической мощности на отметке 500 м от насоса при возникновении утечки с объемным расходом 10 % номинального на расстоянии 600, 800, 1000 и 1200 м от насоса (рис. 2).

Получено, что внезапное появление утечки в ТС (рис. 3,а; 4,а) сопровождается искажением сигналов напора и гидравлической мощности. Их анализ позволил выделить области, где происходит отклонение сигналов напора и гидравлической мощности в системе без утечки и при ее наличии (рис. 3,а; 4,а). При отдалении места возникновения утечки от точки измерения растет время запаздывания сигнала (фазовый сдвиг между двумя анализируемыми кривыми), снижается колебательность переходного процесса, изменяется гармонический состав сигналов.

Расстояние от контрольной точки трубопроводной сети до места утечки определяется зависимостью [8]:

$$x = tc - x_{500}, \quad (6)$$

где t – время прохождения волны давления от контрольной точки измерения до утечки и обратно; c – скорость распространения звука в жидкости, 1400 m/c ; x_{500} – местонахождение точки измерения (в данном случае 500 м).

На рис. 3,б; 4,б представлены спектры сигналов напора и гидравлической мощности, где период времени для анализа сигналов равен:

$$T_v = 2L/c, \quad (7)$$

где L – расстояние от точки измерения до конца трубопровода, m .

Для рассматриваемого случая $T_v = 2 \cdot 1500/1400 = 2,14$ с, что соответствует времени прохождения волны давления от точки измерения (500 м) до конца трубопровода и обратно (рис. 3,а; 4,а). Анализ амплитудных спектров сигналов показал наличие гармоник высших порядков 1, 2, ..., 12 при внезапном возникновении утечки.

Очевидно, что переходные процессы, обусловленные утечкой в ТС, усложняются при наличии разветвлений и местных сопротивлений в гидросистеме, воздушных пробок, самотечных участков, наличием одновременно нескольких порывов в трубопроводе и т.д.

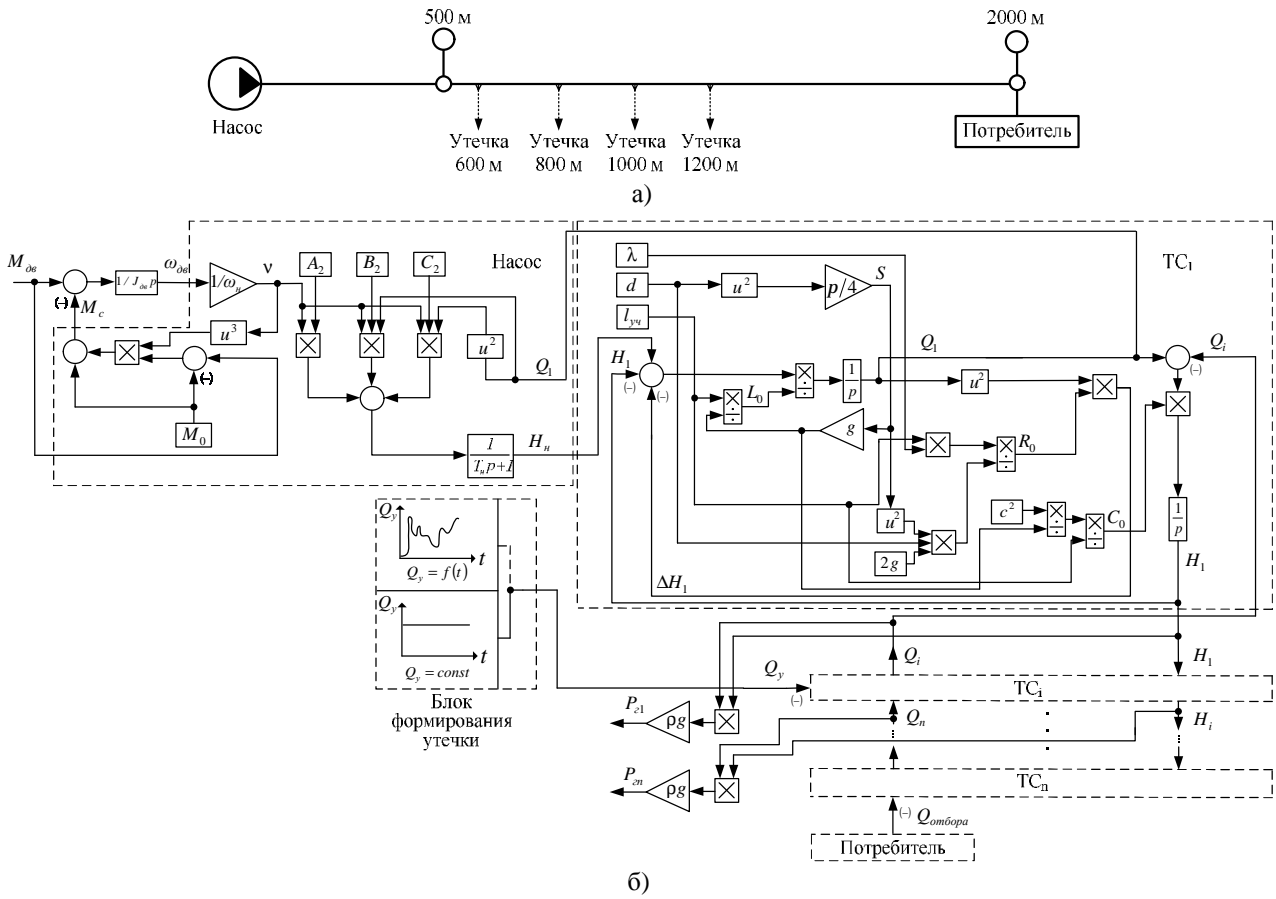


Рисунок 1 – а) упрощенная технологическая схема НК; б) структурная схема математической модели НК

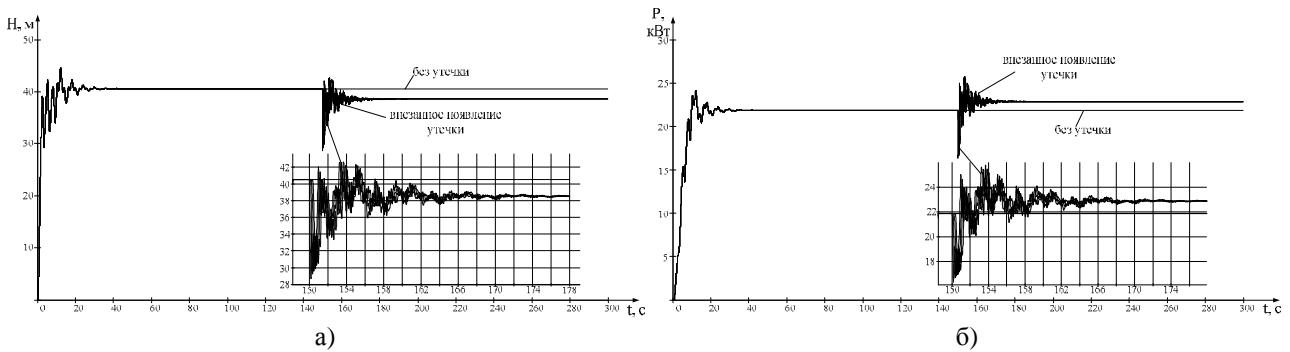


Рисунок 2 – Кривые изменения напора (а) и гидравлической мощности (б) при внезапном появлении утечки в трубопроводной сети

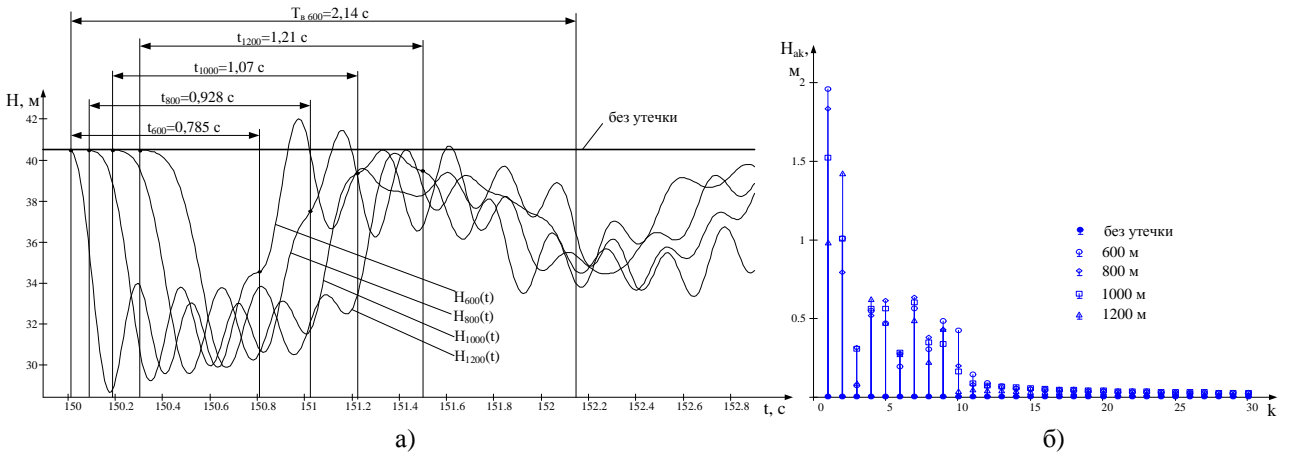


Рисунок 3 – Кривые изменения напора при внезапном появлении утечки на расстоянии 600, 800, 1000 и 1200 м от насоса (а) и их амплитудные спектры (б)

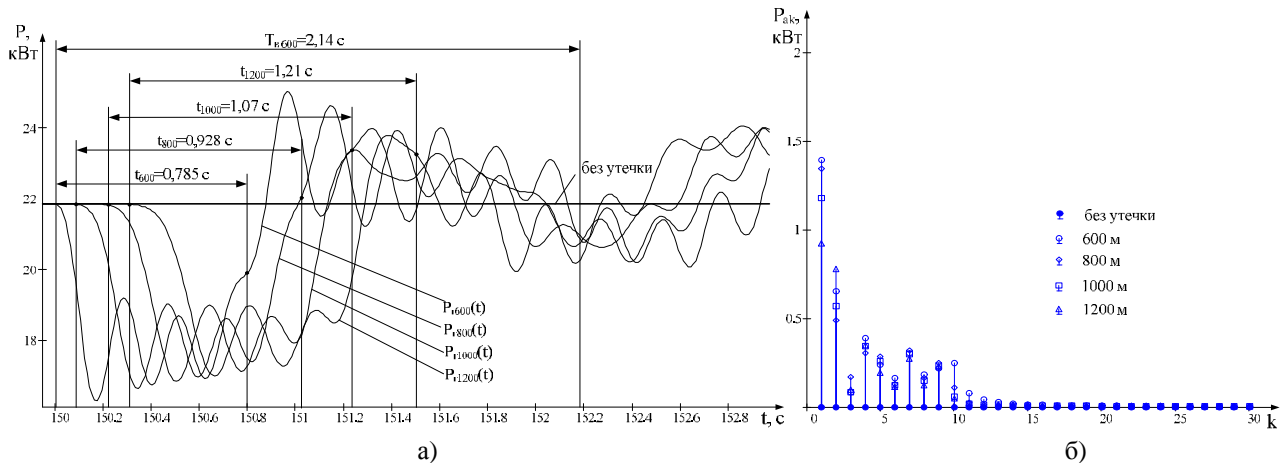


Рисунок 4 – Кривые изменения гидравлической мощности при внезапном появлении утечки на расстоянии 600, 800, 1000 и 1200 м от насоса (а) и их амплитудные спектры (б)

Качественная оценка такого сигнала подразумевает выработку четкой системы идентификационных признаков, позволяющих с достаточной точностью определить характер нештатной ситуации.

ВЫВОДЫ. Внезапное появление утечки в гидросистеме приводит к изменению форм сигналов напора и гидравлической мощности. Анализ полученных кривых позволил выявить наличие гармоник высшего порядка в сигналах напора и гидравлической мощности при внезапном возникновении утечки в трубопроводной сети.

Последующее изучение переходных процессов в насосном комплексе на базе частотного анализа энергопроцессов позволит сформировать совокупность признаков для идентификации параметров гидросистемы с утечкой в трубопроводной сети. Сказанное является принципиально важным при построении систем управления аварийными режимами в насосном комплексе для предотвращения развития нештатных ситуаций и повышения надежности работы электрогидравлического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Петросов В.А. Устойчивость водоснабжения. – Харьков: Фактор, 2007. – 355 с.

3. Гольянов А.А. Анализ методов обнаружения утечек на трубопроводах // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2002. – № 11. – С. 5–14.

4. Кутуков С.Е. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2. – С. 29–45.

5. Spend A., Gruyff F. Обнаружение утечек на нефтепроводе Роттердам-Рейн (Нидерланды–ФРГ). – Siemens, 1973. – Вып. 21. – № 15–16. – С. 563–564.

6. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей // Вісник КДПУ. – 2007. – Вып. 3/2007 (44), ч. 2. – С. 130–136.

7. Ромашихин Ю.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14 НТК. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 273–278.

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

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

10. Лямаев Б.Ф., Небольсин Г.П., Нелюбов В.А. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. Методы расчета на ЭВМ. – Л.: Машиностроение, 1978. – 192 с.

ANALYSIS OF TRANSIENTS IN PUMPING COMPLEX WITH LEAK IN PIPELINE NETWORK

A. Shut'ka

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University

ul. Pervomaiskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: aleks_shu@mail.ru

The analysis of pressure and hydraulic power transients is executed at sudden appearance of leak in a pipeline network. Application of power criterion is offered with the purpose of nonpermanent situation character determination. Resulted expression for leak location determination in hydrosystem. It is rotined that the leak origin in the pipeline system is accompanied distortion of pressure and hydraulic power signals, appearance in them of higher order harmonic.

Key words: pumping complex, transients, leak, mathematical model, power criterion.

REFERENCES

1. Leznov B.S. *Energy-savings and control drive in the pumpings and blast settings*. – М.: Energoatomizdat, 2006. – 360 p. [in Russian]
2. Petrosov V.A. *Stability of water-supply*. – Kharkov: Factor, 2007. – 355 p. [in Russian]
3. Gol'yanov A.A. Analysis of methods of finding out losses on pipelines // *Transport and storage of petroleum products*. – 2002. – № 11. – PP. 5–14. [in Russian]
4. Kutukov S.E. Problem of sensitisation, reliability and fast-acting of the systems of finding out losses in the pipelines of // *Oil and Gas Business*. – 2004. – Т. 2. – PP. 29–45. [in Russian]
5. Spend A., Gruyff F. *Finding out leaks on an oil pipeline Rotterdam-Rain (Netherlands–FRG)*. – Siemens, 1973. – Iss. 21. – № 15–16. – PP. 563–564.
6. Romashikhin Yu.V., Rod'kin D.I., Kalinov A.P. The power method of asynchronous drivers parameters authentication // *Bulletin KDPU*. – Iss. 3/2007 (44), part 2. – PP. 130–136. [in Russian]
7. Romashikhin Yu., Rod'kin D., Kalinov A. Efficiency of energydiagnostics alternating current drivers parameters method // *Electromechanics of alternating current: Labours international 14 NTK*. – Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2007. – PP. 273–278. [in Russian]
8. Vishnevskiy K.P. *Transients in the pressure of water supply system*. – М.: Agropromizdat, 1986. – 135 p. [in Russian]
9. Charniy I.A. *Unset motion of the real liquid in pipes*. – М.: Nedra, 1975. – 296 p. [in Russian]
10. Lyamaev B.F., Nebol'sin G.P., Nelyubov V.A. *The Stationary and transitional processes in difficult gidrosystems. Methods of calculation on computer*. – L.: Mashinostroyenie, 1978. – 192 p. [in Russian]

Стаття надійшла 16.04.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Кореньковою Т.В.