

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

**С.В.ШИЛЬКО**

К.т.н., заведующий лабораторией

**Ю.Г.КУЗЬМИНСКИЙ**

Старший научный сотрудник

**Ю.М.ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ**

Д.т.н., ведущий научный сотрудник

ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого Национальной Академии наук Беларуси», г.Гомель, Беларусь

**Р.И.ВОРОБЕЙ**

К.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Беларусь

*В статье изложен инновационный подход к анализу энергоэффективности городского водоснабжения на основе гидродинамической 0-D модели.*

Основные особенности современного городского водоснабжения [1] – сложная сетевая структура трубопроводов с несколькими станциями водоподъема, непрерывные суточные изменения числа потребителей, постепенное уменьшение производительности насосов вследствие изнашивания. Специфической проблемой городских систем водоснабжения стран СНГ является недостаточно гибкое управление, связанное с ограниченным использованием средств частотного регулирования мощности насосов, применение которого еще недавно ограничивалось магистральными нефтепроводами [2,3].

В качестве интегрального показателя энергоэффективности городского водоснабжения обычно принимается удельный расход электроэнергии [4]. Непосредственное влияние на энергоэффективность водоснабжения оказывают коэффициент полезного действия (КПД) насосов [5] и эквивалентные диаметры отводов. В свою очередь, недостаточно высокий КПД насосов обусловлен несоответствием фактической объемной скорости водоподдачи номинальным параметрам производительности и значительной рециркуляцией воды вследствие износа щелевых уплотнений рабочих колес [6].

Обоснование мероприятий по повышению энергоэффективности водоснабжения во многом базируется на математическом моделировании гидродинамических процессов [7-14]. В частности, применение методов 0-D моделирования, описывающего гидродинамические процессы в обобщающем понятии «приведенный диаметр», способствует достижению ощутимых практических результатов при минимальных затратах интеллектуальных и вычислительных ресурсов путем замены систем дифференциальных уравнений гидродинамики на прямые зависимости вышеуказанных параметров. Это позволяет решать задачи мониторинга и управления в реальном масштабе времени, в т.ч. использовать результаты моделирования в оперативной деятельности.

Функциями исследовательской версии разработанного комплекса компьютерных программ «СИТИГИДРО»+«ДИНАС» [9,10], реализующих разработанную модель городского водоснабжения, являются:

1. Создание баз данных автоматически рассчитываемых паспортных характеристик насосов, определение фактических параметров регулирования и зазора щелевого уплотнения на основе идентификации модели насосов в программном продукте «ДИНАС».

2. Анализ изменения приведенного диаметра трубопроводов во времени на основе суточной и помесечной статистики водопотребления; 0-D моделирование режимов общего городского водоснабжения для прогнозирования объемной скорости, давления, коэффициента полезного действия, удельного расхода энергии, числа активных потребителей, а также прогноза параметров локальной системы скважинного водосбора в программном продукте «СИТИГИДРО».

Разработанная авторами модель городского водоснабжения включает модели насосных агрегатов, локальной системы скважинного водосбора и отводящего трубопровода, а также взаимодействия станций водоснабжения.

Основными аналитическими зависимостями модели насосного агрегата [14] являются параболические аппроксимации напорной ( $h$ ) и мощностной ( $N$ ) характеристик (зависимостей от объемной скорости  $q$ ) насоса, где учитываются коэффициент регулирования  $k_r$ :

$$\begin{cases} k_r^2 a + k_r b q + c q^2 = h \\ k_r^3 a_e + k_r^2 b_e q + k_r c_e q^2 = N \end{cases}$$

Коэффициент регулирования является произведением коэффициентов изменения частоты тока и изменения диаметра рабочего колеса насоса. Регулирование позволяет изменить номинальную подачу (объемную скорость при максимальном КПД) насоса. Коэффициент  $k_z$  увеличения зазора в результате изнашивания определяется следующим образом:

• исходя из фактических значений напора и подачи, а также коэффициентов аппроксимации характеристики напора, вычисляются гидравлические потери из уравнения:

$$h_{\text{факт}} = a + b(q_{\text{факт}} + \Delta q) + c(q_{\text{факт}} + \Delta q)^2;$$

• по фактическим давлениям  $P_{\text{до}}$  и  $P_{\text{за}}$ , плотности  $\rho(t)$ , размерам колеса и вычисленным гидравлическим потерям  $\Delta q$  определяется коэффициент увеличения зазора из уравнения:

$$k_{\varepsilon} = \frac{\Delta q}{2\pi d_1 b \frac{1}{\sqrt{\frac{0,061}{2b} + 1,5}} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 (P_{\text{за}} - P_{\text{до}})}{\rho(t)}}}$$

Мониторинг состояния насоса при помощи программы «ДИНАС» [10] состоит в периодической расчетной оценке коэффициентов  $k_r$  и  $k_z$ . Для идентификации состояния насоса городского водоснабжения в качестве входных данных необходимо задать тип насоса, давление, величину подачи и потребляемую мощность. Результатами идентификации являются коэффициенты регулирования и увеличения зазора, фактические номинальные параметры насосов при данном коэффициенте регулирования, экономическая оценка потерь электроэнергии.

**Модель скважинного водосбора** полезно использовать для оптимизации энергопотребления на стадии проектирования (выбор типа насосов) и диспетчеризации (выбор числа насосов). В число параметров модели входит длина и диаметр трубопроводов, глубина скважин, типы насосов, уровень воды в резервуарах и перечень включенных насосов. В результате моделирования определяется объем подаваемой воды и совокупная потребляемая мощность. Диаметры трубопроводов водосбора настолько велики, что потери напора вследствие турбулизации течения можно не учитывать. Фактически энергоэффективность водосбора зависит от удачного выбора включаемых насосов при «плавающей» глубине уровня воды. По данным производителей, энергоэффективность насосов водосбора гораздо ниже энергоэффективности насосов подачи воды.

**Модель локального отвода** станции 2-го подъема построена в предположении фиксированных значений конечного давления воды у потребителя и длины эквивалентного трубопровода, заменяющего реальную сетевую структуру. Приведенный диаметр отводящего трубопровода определяется диаметром фиксированной части и числом активных потребителей воды в данный момент [13]. Параболическая зависимость числа потребителей и объемов водоподдачи от сезона и времени устанавливается статистическими методами. Модель системы городского водоснабжения и реализующая ее компьютерная программа

«СИТИГИДРО» полезна для диспетчеризации водоснабжения в том случае, если обеспечивает персонал инструментом выбора эффективного режима подачи воды. Основным уравнением для определения объема подачи воды станцией является уравнение баланса напора, генерируемого насосами и расходуемого на турбулентное течение в трубопроводах

$$\begin{aligned} & fkr(p_{\text{max}})^2 a + fkr(p_{\text{max}}) b \cdot fq(kr) + c \cdot fq(kr)^2 = \\ & = 0,0247 \frac{v^{0,25} q^{1,75}}{fd(q)^{4,75}} + h_{\text{кон}} - h_{\text{нач}} \end{aligned}$$

где  $fd$ ,  $fq$ ,  $fkr$  – функции определения числа активных пользователей и приведенного диаметра трубопровода по объему подачи вода, распределения потоков по параллельным насосам с учетом частотного регулирования, расчета коэффициента регулирования по подаче насоса и пределу давления;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты аппроксимации паспортной характеристики насоса.

Входными параметрами являются текущий месяц, почасовой график включенных насосов, пределы выходных давлений и наличие частотного регулирования. На выходе модели почасовой график параметров (давление, подача, КПД, число активных пользователей), интегральные параметры (подача, потребление и стоимость электроэнергии, а также ее удельный расход). Цветом выделяются низкие значения КПД, избыточное применение параллельных насосов и нарушение уставок при отсутствии частотного регулирования. Сопоставление двух режимов позволяет производить диспетчерские оптимизационные решения.

Практическими инструментами управления являются задание числа насосов, работающих на станциях подачи воды, и пределы выходных давлений, устанавливаемые на станциях в системе частотного регулирования. Поскольку насосы переключаются довольно редко, пределы давлений остаются наиболее распространенным средством диспетчеризации водоподдачи.

Зачастую сетевые отводы от разных станций подачи воды пересекаются. Изменение предела давления на одной станции ведет к изменению коэффициента регулирования, с неизбежным изменением объема подаваемой воды. При неизменности объема потребляемой воды это ведет к изменению числа активных пользователей и объема подачи воды на станциях, сетевые отводы которых пересекаются с отводом станции измененного выходного давления. Изменение подачи воды станциями ведет к изменению КПД насосов и общего коэффициента удельного расхода энергии  $A$ . Поэтому искусство диспетчеризации водоснабжения воспитывается у персонала в течение длительного периода времени. Установ-

ление связи изменения объема водоподдачи на станции с измененным пределом давления и на смежных станциях осуществляется через число активных пользователей.

Охарактеризуем способы снижения потребления электроэнергии по сравнению с исходным (фактическим) режимом (табл.1):

- замена насосного агрегата или капитальный ремонт щелевых уплотнений при наличии собственной службы или подрядной организации (данная процедура периодична и повышает затраты на водоподачу);
- перераспределение объемов подачи воды станциями изменением пределов выходных давлений, вызывающим изменение направлений потоков и соответствующий размыв отложений.

Таблица 1  
Оценка способов повышения энергоэффективности

Режим	Производительность	Удельный расход электроэнергии
Фактический	100%	100%
Изменение пределов давления	100,1%	95,3%
Восстановление щелевого уплотнения	100%	89,3%

Для анализа параллельной работы насосов предложен специальный калькулятор, отражающий взаимодействие насоса с регулированием и насоса без регулирования. Приводятся фактические характеристики насосов, коэффициент регулирования первого насоса, его доля в подаче воды, потребляемая энергия и КПД системы. Пользователь может менять уставки регулирования и объем подачи воды. Автономное использование калькулятора позволяет прогнозировать распределение потоков по параллельным насосом без проведения натурных экспериментов. Основным результатом прогнозирования является выявление режимов, при которых второй насос не несет нагрузки. Вопросы верификации разработанных 0-D моделей «ДИНАС» и «СИТИГИДРО» решались сопоставлением фактических параметров и модельных результатов. В частности, для идентификации и верификации «СИТИГИДРО» важными параметрами являются давление, объем подачи, уровень в резервуарах, частота тока и токовая нагрузка насосов.

**Выводы.** Полученные результаты целесообразно использовать для информационной поддержки принятия решений по выбору технологического режима, реконструкции систем водоснабжения, периодичности планово-профилактических, ремонтных работ и обучения оперативного персонала предприятий водоснабжения.

Применение разработанных гидродинамических моделей и программного обеспечения в контуре идентификации состояния оборудования и диспетчеризации способствует повышению энергоэффективности городского во-

доснабжения. На их основе планируется создать программно-аппаратные средства текущего контроля состояния щелевых уплотнений насосов и автоматического управления пределами выходных давлений на станциях подачи воды.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Эгильский И.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды.- Л.: Стройиздат, 1988.
2. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Определение нижней границы диапазона частотного регулирования электродвигателей магистральных насосов // Нефтегазовое дело. 2010.- <http://www.ogbus.ru> (Дата обращения 13.01.2013).
3. Каргин С.А. Анализ потерь энергии при работе группы насосов, оснащенных регулируемым приводом // Нефтегазовое дело. 2009. <http://www.ogbus.ru> (Дата обращения 13.01.2013).
4. Пивоваров В.Ф., Шефель О.М. Энергосбережение и энергосберегающие технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве // Реконструкция жителя. 2006. Выпуск 6.
5. Николаев В.Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения // Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук.- М.: 2010.
6. Мельник В.А. Щелевое уплотнение с деформируемой втулкой // Сб. тр.10 МНТК «ГЕРВИКОН-2002».- Сумы: 2002.
7. Костышин В.С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии.- Ивано-Франковск: 2000.
8. Кузьминский Ю.Г., Шилько С.В., Вьюн В.И. Расчет гидравлических характеристик путем идентификации моделей насосных агрегатов и перекачивающих станций магистральных нефтепроводов // Механика машин, механизмов и материалов. 2008. №2.
9. Свид. №325 от 21.07.2011 о регистрации компьютерной программы СИТИГИДРО V1.1 / Ю.Г.Кузьминский, С.В.Шилько // Нац. центр интелектуал. уласнасці. 2011.
10. Свид. №254 от 16.11.2010 о регистрации компьютерной программы ДИНАС V1.0 / Ю.Г.Кузьминский, С.В.Шилько // Нац. центр интелектуал. уласнасці. 2010.
11. Шилько С.В., Кузьминский Ю.Г., Плескачевский Ю.М. Компьютерная диагностика фактического состояния насосных агрегатов как средство повышения энергоэффективности водоснабжения / 3 МНТК Приборостроение-2010.- Минск: БНТУ, 2010. С.133-134.
12. Кузьминский Ю.Г., Шилько С.В. Анализ энергоэффективности трубопроводного транспорта на основе гидродинамической модели // 7 МНТК Надежн. и безопасн. магистр. трубопров. транспорта.- Новополоцк: ПГУ, 2011.
13. Адаптивная система управления водоснабжением города / Ю.Г.Кузьминский [и др.] // Матер. 4 Междун. н/т конф. Приборостроение-2011.- Минск: БНТУ, 2011. С.104-105.
14. Кузьминский Ю.Г., Шилько С.В. Применение математической модели для повышения энергоэффективности городского водоснабжения // Междун. конф. «Совр. проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика».- Новосибирск: 2011.- <http://conf.nsc.ru/niknik-90/reportview/37764> (Дата обращения 13.01.2013).