

Трубаев П.А., д-р техн. наук, доц.,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТОЙ НАСОСОВ И НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

trubaev@gmail.com

Предлагаются методы автоматизированного проведения расчётов режимов работы и регулирования насосов и насосных установок при их работе в гидравлической сети. В отличие от известных методов, характеристики насосов представляются не в виде аппроксимирующих уравнений, а в табличном виде. Решение системы уравнений, включающей уравнения напорных характеристик сети и насоса, производится численными методами. Суммирование характеристик при последовательной или параллельной насосов, также производится численными методами, в результате которого получается новая табличная зависимость для установки (новый объект). Применение объектно-ориентированного подхода для реализации алгоритмов расчёта позволило создать универсальные методы, позволяющие рассчитывать как работу отдельных насосов, так и установок из нескольких разнотипных последовательных или параллельных насосов (насосных станций), работающих с разными частотами вращения и с разной степенью закрытия регулирующих задвижек.

Ключевые слова: нагнетатели, насосы, регулирование, энергосбережение, автоматизация.

Введение

Насосные установки, представляющие собой один или несколько насосов, совместно работающие на общую гидравлическую сеть, в России ежегодно расходуют около 200 млрд. кВт·ч электроэнергии, т. е. примерно 20% всей электроэнергии, вырабатываемой энергосистемами страны [1, 2]. К сожалению, большинство насосных установок работает не самым экономичным образом. По данным работ [1, 3] из-за неправильного выбора и регулирования насосных установок перерасход электроэнергии в них составляет 10–25%.

Одним из важных характеристик работы динамических нагнетателей, к которым относятся насосы, вентиляторы и компрессоры, является то, что расход среды в сети (подача насосов, производительность вентиляторов и компрессоров) определяется напорными характеристиками сети и нагнетателя (рабочей точкой). При необходимости работы с переменным расходом его изменение (регулирование нагнетателя) возможно только путем изменения одной из этих характеристик так, чтобы рабочая точка соответствовала нужному расходу. Используются два основных способа регулирования (рис. 1):

а) дросселирование, то есть изменение напорной характеристики сети путем ввода дополнительного сопротивления при закрытии вентиля или задвижки;

б) частотное регулирование, то есть изменение напорной характеристики нагнетателя.

Дросселирование наиболее просто технически, но характеризуется повышенными затратами электроэнергии. Изменение частоты вращения, наоборот, требует значительных капитальных затрат, но затраты на перекачку среды в этом случае минимальны.

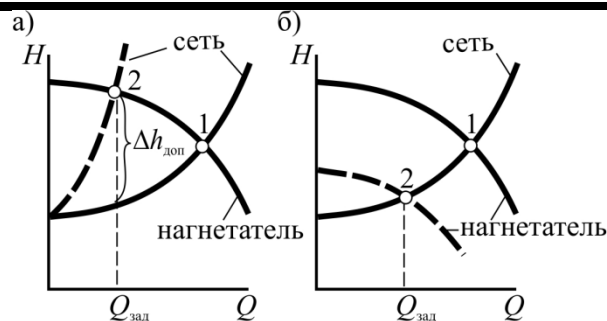


Рис. 1. Дроссельное (а) и частотное (б) регулирование насосов:

Q – расход (подача); H – давление (напор); 1 – рабочая точка без регулирования; 2 – рабочая точка при регулировании; $Q_{\text{зад}}$ – необходимая подача при регулировании; $\Delta h_{\text{доп}}$ – сопротивление регулирующей задвижки

Таким образом при автоматизации управления насосами и насосными станциями необходимо решать следующие задачи:

- нахождение рабочей точки (пересечения напорной характеристики сети и насоса или насосной установки);
- пересчёт характеристик при изменении частоты вращения;
- суммирование характеристик при последовательной и параллельной работе насосов, в том числе с учётом работы насосов в распределённой сети и изменении их частоты вращения;
- выбор наиболее экономичного способа регулирования насоса или насосной станции на заданную подачу, что является одним из основных путей энергосбережения при эксплуатации насосов [1, 4, 5].

Существующие методы расчёта работы насосов в сети [6–9] основаны на графических построениях. Обработка паспортных характеристики промышленных насосов и вентиляторов показала, что их напорные характеристики (за-

висимость напора от подачи) в общем случае не могут быть описаны полиномами высоких степеней. Напорная характеристика гидравлической сети (зависимость её сопротивления от подачи), в связи с изменением коэффициента гидравлического трения, также не может быть точно описана полиномом или уравнением другого вида. Таким образом решение перечисленных выше задачах на основе совместного решения системы аппроксимирующих уравнений для насоса и сети не обладает точностью, требуемой для задач управления. Поэтому в задачах автоматизации и управления применение этих методов становится затруднительно, особенно при совместной работе нескольких насосов, когда минимум энергозатрат может обеспечиваться при различных режимах работы и регулирования каждого из них.

Основные отличия работы

В работе поставлена задача создания методов для автоматизированного проведения расчетов работы и регулирования нагнетателей при их работе в гидравлической сети, что необходимо необходимо при решении задач автоматизации и управления насосным оборудованием с целью снижения затрат энергии при их эксплуатации.

Для этого создано алгоритмическое обеспечение для решения следующих задач:

- создание базы данных насосов, содержащей их напорные характеристики, характеристики мощности и КПД, конструктивные размеры;
- пересчет характеристик при изменении частоты вращения;
- суммирование характеристик при последовательной и параллельной работе насосов, в том числе с учетом работы насосов в распределенной сети и изменении их частоты вращения;

- нахождение рабочей точки (пересечения напорной характеристики сети и насоса или насосной установки);

- выбор наиболее экономичного способа регулирования насоса или насосной станции на заданную подачу.

Отличие работы от имеющихся заключается в следующем,

- методика расчетов основана на объектно-ориентированном подходе. Методы расчета в качестве данных используют классы (обобщенное описание насоса и сети), а не конкретные физические объекты. Это позволило создать универсальные методы, позволяющие рассчитывать как работу отдельных насосов, так и установок из нескольких разнотипных последовательных или параллельных насосов (насосных станций), работающих с разными частотами вращения и с разной степенью закрытия регулирующих задвижек;

- в расчётах характеристики насосов представляются не виде аппроксимирующих уравнений, а в табличном виде (в форме массивов), дискретизация данных производится интерполяцией с помощью полиномов Лагранжа и линейной экстраполяцией. Решение системы уравнений, включающей уравнения напорных характеристик сети и насоса, производится численными методами. Суммирование характеристик при последовательной или параллельной работе насосов также производится численными методами, в результате которого получается новая табличная зависимость для установки (новый объект).

Описание насоса

Насосы представляются в виде объектов на основе класса *TPump* (рис. 2).

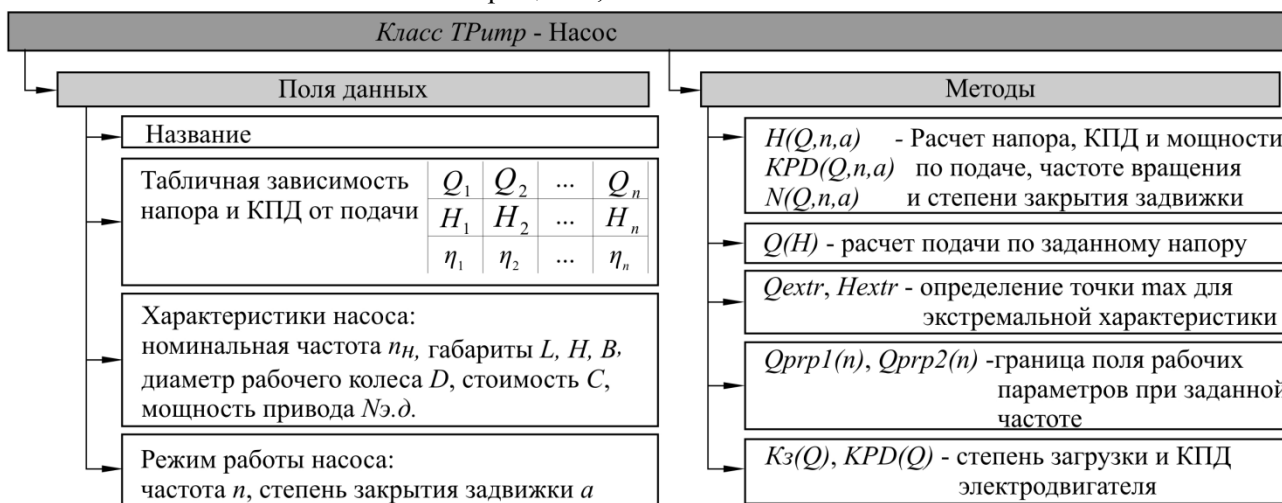


Рис. 2. Описание насоса

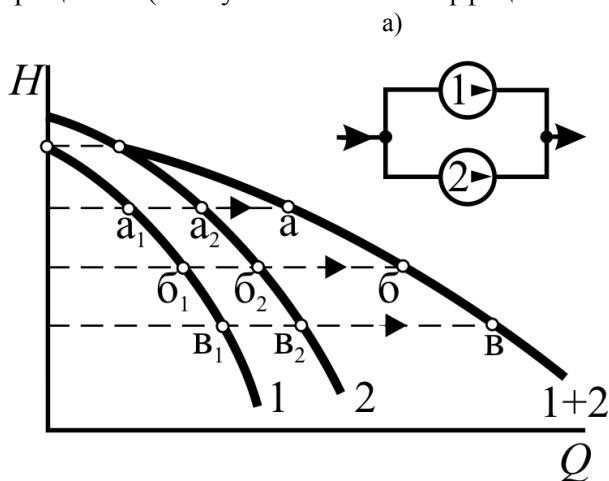
Поля класса включают массив табличных характеристик насоса, его размеры, частоту ра-

боты, стоимость. Методы класса включают функции $H(Q)$, $N(Q)$, $KPD(Q)$ для расчета соот-

ветственно напора, мощности и КПД по подаче, выполняемого интерполяционным полиномом Лагранжа и линейной экстраполяцией. По характеристике КПД определяется поле рабочих параметров (рабочая часть) насоса, ограничиваемая значениями КПД, равными максимальному значению минус 7%. Класс также содержит метод $Q(H)$ для расчета подачи при заданном напоре H , выполняемом численным решением уравнения $H(Q) = H$. При расчете напора учитывается сопротивление регулировочного вентиля, зависящее от степени его закрытия, и текущая частота работы насоса.

Мощность определяется с учетом КПД электродвигателя, оцениваемого по его степени загрузки.

Для насоса может быть изменена частота вращения (это учитывается коэффициентами



пересчёта подачи k_Q и напора k_H) и степень закрытия задвижки, учитываемая составляющей H' . Коэффициент сопротивления задвижки ξ в зависимости от степени ее закрытия a определяется по эмпирическому уравнению

Алгоритмы суммирования характеристик при последовательной и параллельной работе насосов

Для суммирования характеристик насосов (рис. 3) определяется интервал суммирования по напору или подаче (соответственно при параллельной или последовательной работе), общий для обоих насосов. Интервал равномерно разбивается на 20 точек, в каждой точке суммируется подача или напор, результаты помещаются в новый объект класса *TPump*.

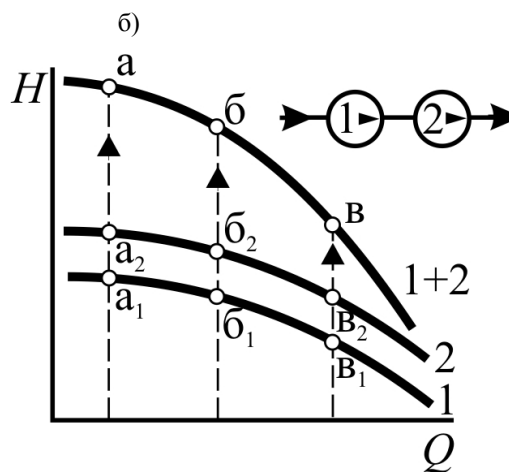


Рис. 3. Расчет суммарной характеристики насосов при их параллельном (а) и последовательном (б) соединении в сеть в любом количестве и удалены из неё.

Алгоритм суммирования представлен на рис. 4.

Разработанный способ позволяет суммировать характеристики насосов разного типа и насосов, характеристики которых изменены при регулировании. Это позволяет рассчитывать режим работы установок из двух или более параллельных или последовательных насосов в сети, где для каждого насоса может быть задана свои частота вращения и степень закрытия задвижки.

Разработка алгоритмов нахождения рабочей точки

Водопроводная сеть описывается классом *TNet* (рис. 5). Сеть может быть задана как своими геометрическими характеристиками (длина, диаметр и материал труб, высота подъема, набор местных сопротивлений), так и в виде упрощённого квадратичного уравнения.

Местные сопротивления описываются классом *TSopt* (рис. 6). Для них может быть задан как коэффициент сопротивления, так и табличная зависимость коэффициента от скорости среды. Местные сопротивления могут быть добав-

Режим работы насоса в сети (рис. 7) определяется численным решением уравнения $H_c(Q) = H(Q)$. Расчет построен на использовании двух классов – *TPump* и *TNet* (причем в качестве насоса может выступать любой объект класса *TPump*, в том числе, и результат суммирования двух или более насосов при их параллельной или последовательной работе).

Численное нахождение подачи, при которой напор насоса будет равен сопротивлению сети проводится методом пошагового приближения с уменьшением шага и изменением направления движения при прохождении решения.

Выбор наиболее экономичного способа регулирования насосной установки

Предлагаемый подход позволил создать универсальные методы расчётов, позволяющие решать задачи выбора оптимального диаметра трубопроводов, выбора насосов, исследования работы насосов и насосных установок в сети, выбора наиболее экономичного способа регулирования.

Рассмотрим работу насосной станции холодной воды АО «Белгородский цемент», на которой установлены три насоса 4НДВ (Д-200-36) 1984 г. выпуска. Насосная станция работает с переменной подачей воды, максимальный расход составляет 600 м³/ч. Регулирование насосной станции дроссельное. В табл. 1 приведено

сравнение потребляемой мощности при существующем режиме работы и при оснащении насосов электродвигателями с частотными электроприводами, позволяющими плавно регулировать частоту вращения (результаты получены расчётом в программе на основе предложенных методов).

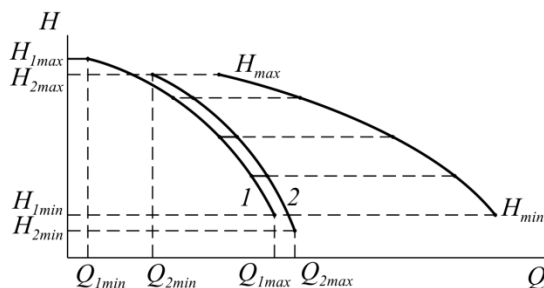
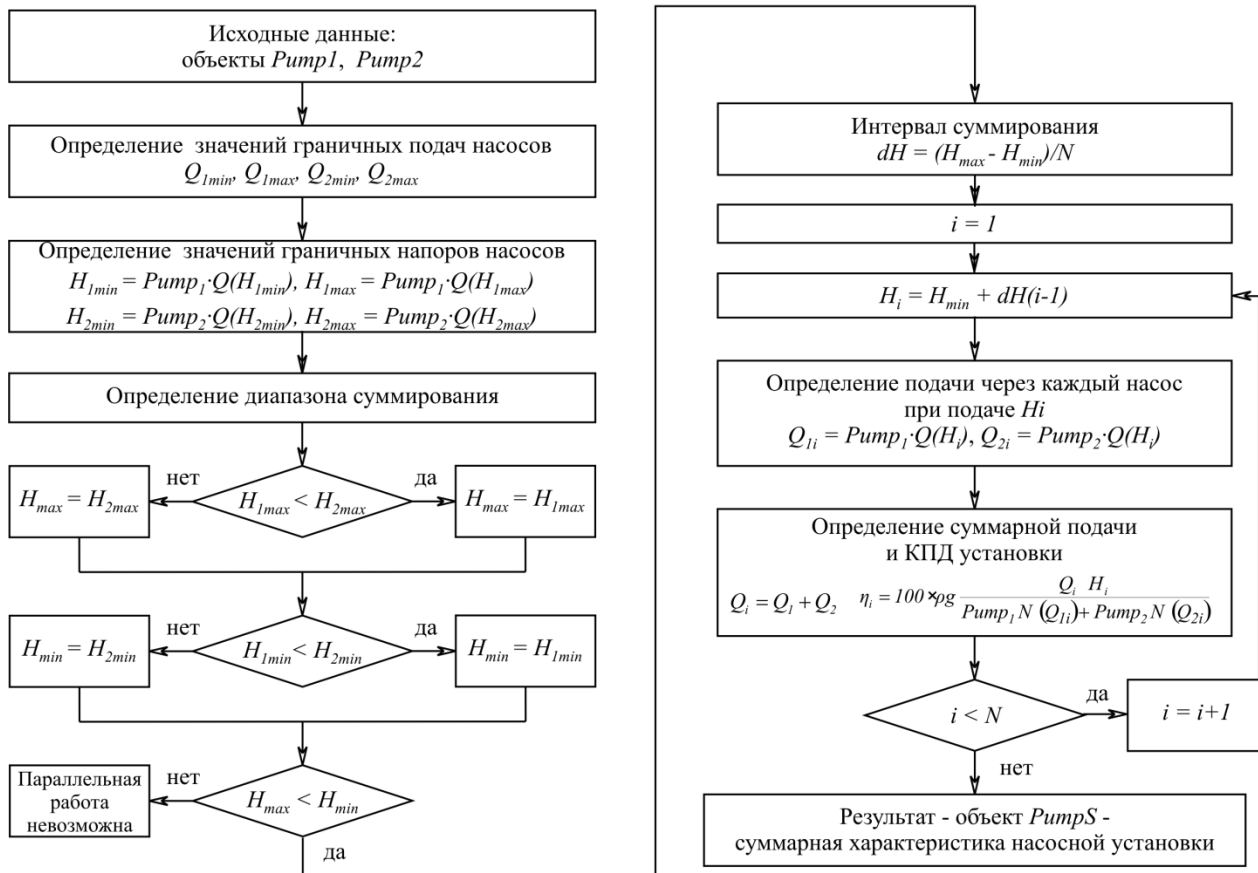


Рис. 4. Численный метод определения напорной характеристики

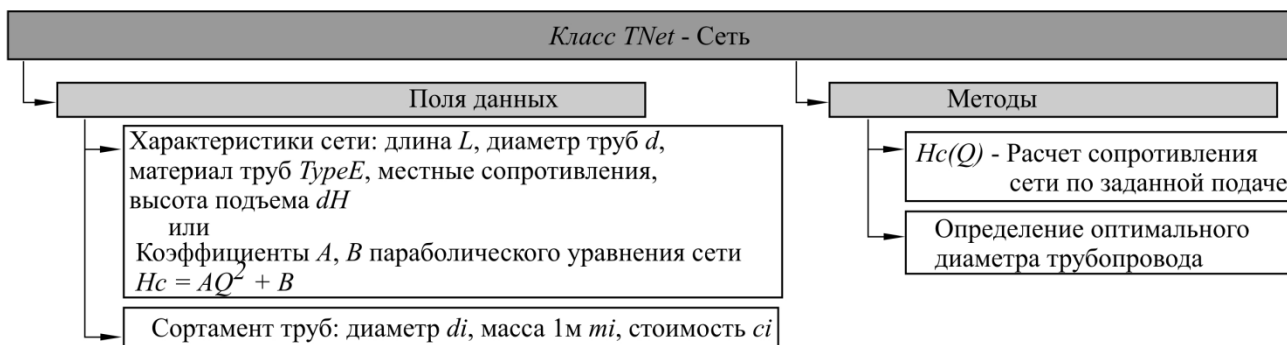


Рис. 5. Описание водопроводной сети

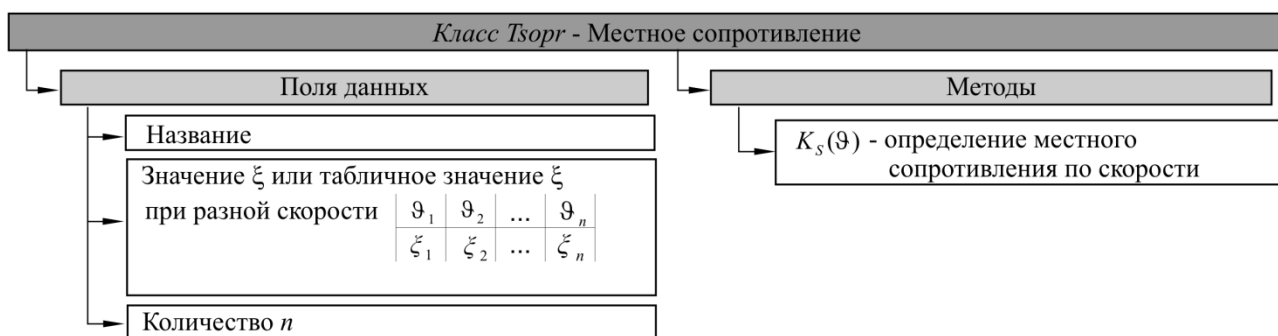


Рис. 6. Описание местного сопротивления

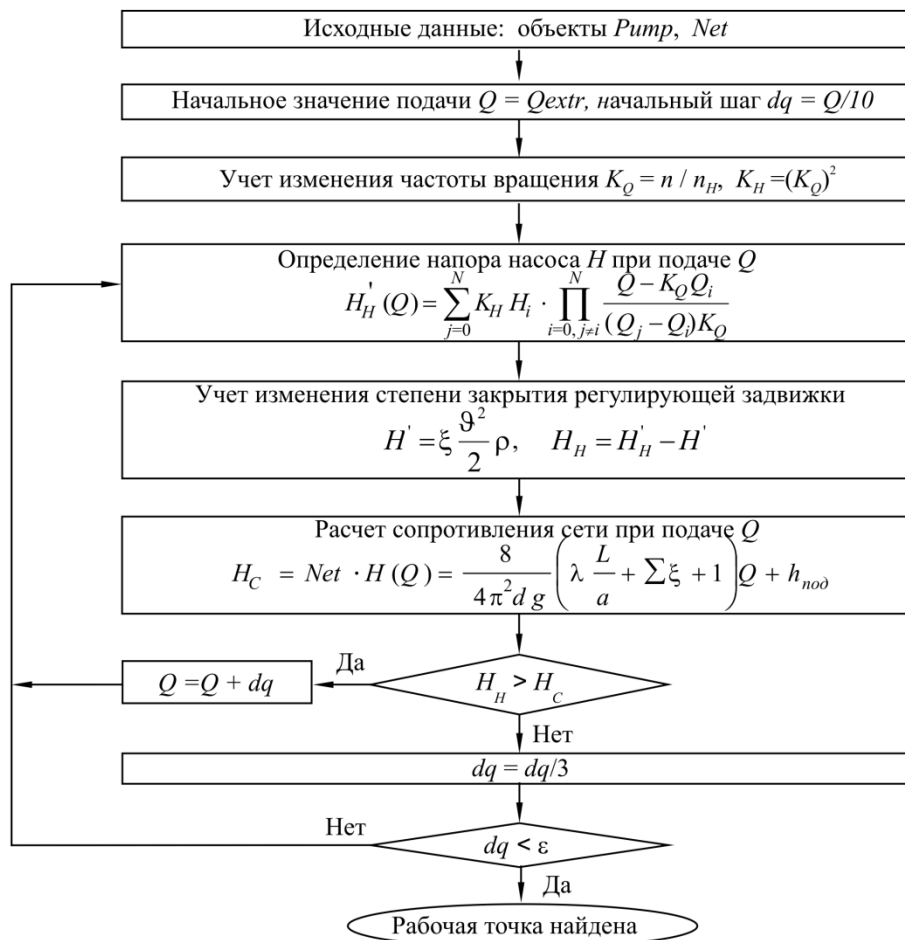


Рис. 7. Численный расчет рабочей точки (режима работы насоса в сети)

Таблица 1

Энергопотребление насосной станции

Время работы	Поддача, м ³ /ч	Режим работы при дроссельном регулировании (существующий)			Режим работы при частотном регулировании (оптимальный)		
		Потребляемые работа и мощность		Удельная мощность кВт/м ³	Потребляемые работа и мощность		Удельная мощность кВт/м ³
		кВт·ч	кВт		кВт·ч	кВт	
0 ⁰⁰ – 4 ⁰⁰	375 (63% от max)	250,0	62,5	0,167	160,6	40,15	0,107
4 ⁰⁰ – 8 ⁰⁰	425 (71% от max)	267,3	66,8	0,157	187,2	46,8	0,110
8 ⁰⁰ – 12 ⁰⁰	525 (88% от max)	276,1	69,0	0,131	244,6	61,15	0,116
12 ⁰⁰ – 16 ⁰⁰	600	300,5	75,1	0,125	300,5	75,125	0,125
16 ⁰⁰ – 20 ⁰⁰	450 (75% от max)	264,9	66,2	0,147	201,2	50,3	0,112
20 ⁰⁰ – 24 ⁰⁰	375 (63% от max)	250,0	62,5	0,167	160,6	40,15	0,107
Всего за сутки		1608,8	–	–	1254,7	–	–

Как видно, перерасход электроэнергии в сутки при неоптимальном регулировании составляет 354,1 кВт·ч, или 129,2 тыс. кВт·ч в год (или 22% от потребления).

Выводы. Разработанные методы позволили создать универсальные методы расчётов, особенностью которых является применение объектно-ориентированного подхода и использование численных методов для определения рабочей точки и получения суммарной характеристики насосов при их параллельной и последовательной работе, что позволяет оценивать режимы и энергопотребление при различных способах регулирования насосов и насосных станций, производить подбор насосов, оценивать возможный диапазон регулирования. Это позволяет их использовать в задачах управления регулированием промышленного оборудования для оценки экономичности работы насосов, а также в проектных организациях при проектировании насосных станций и водопроводных сетей и в учебном процессе для изучения принципов работы насосов в сети и их регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лезнов Б. С. Экономия электроэнергии в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
2. Троицкий А. А. Энергоэффективность как фактор влияния на экономику, бизнес, организацию энергосбережения // Электрические станции. Энергопрогресс. 2005. № 1. С. 11–16.
3. Куцев Л.А., Дронова Г.Л. Пути снижения энергозатрат в жилищно-коммунальном хозяйстве // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2008. № 2. С. 24–25.
4. Козлов М., Чистяков А. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми приводами // Современные технологии автоматизации. 2001. № 1. С. 76–78.
5. Козлов А. Эффективность применения частотно-регулируемого электропривода на канализационных насосных станциях // Современные технологии автоматизации. 2005, № 3. С. 82–85.
6. Тепловые и атомные электростанции: Справочник / Под общ. ред. А. В. Клименко и В. М. Зорина. 3-е изд., перераб. и дополн. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 648 с. (серия «Теплоэнергетика и теплотехника»).
7. Lobanoff M. S., Ross R. R. Centrifugal Pumps: Design & Application. – 2nd ed. – Wildwood (USA): Butterworth-Heinemann, 1992. – 577 p.
8. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с.
9. Один из вариантов математической модели управления приводом модифицированной системы отопления зданий и сооружений / Федоров С.С., Кобелев Н.С., Тютюнов Д.Н. и др. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 25–27.