

УДК 536. 54

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ НАСОСОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ И НЕРЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

**С.В. Колесников, В.А. Кудинов, А.Э. Кузнецова, А.Н. Бранфилева,
М.П. Скворцова**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: totig@yandex.ru

Приведены результаты проведенных на компьютерной модели исследований совместной работы насосов с регулируемым и нерегулируемым числом оборотов приводного двигателя. Построена кривая экономии мощности в зависимости от расхода через насос с регулируемым приводом, работающий в составе группы насосов с нерегулируемыми приводами. Для системы, состоящей из шести параллельно работающих насосов, один из которых – с регулируемым приводом, указан диапазон расходов, в котором наблюдается максимальная экономия мощности. Показано, что для регулирования переменного расхода в сети при постоянном напоре на выходном коллекторе, объединяющим выходные трубопроводы всех параллельно соединенных насосов, достаточно установить регулируемый привод лишь на одном из насосов.

Ключевые слова: компьютерная модель, законы Кирхгофа, характеристики насосов, характеристика гидравлической сети, регулируемый привод, кривая экономии мощности.

Из практики эксплуатации теплосетей известно, что в ряде случаев значительная доля напора, вырабатываемого насосами, гасится на регулирующих задвижках. Такая ситуация обусловлена тем, что рабочее давление на различных тепловыводах, запитываемых от одного коллектора, может быть неодинаковым. К тому же в номенклатуре выпускаемых насосов не всегда оказывается возможным найти насосы с требуемой в каждом конкретном случае подачей. В связи с этим на практике обычно применяют насосы с более высокими характеристиками, чем те, которые требуются. Повышенные на выходе насосов напоры гасятся с помощью соответствующих задвижек. Характеристика насоса в этом случае принимает вид кривой 1' (рис. 1).

При полностью открытой задвижке на выходе насоса пересечение характеристики насоса и сети происходит в точке A_1 . В этом случае при напоре H_1 расход жидкости в сети равен Q_1 . В случаях, когда потребителю требуется напор меньший, чем H_1 , например H_2 , его можно достичь прикрытием задвижки, расположенной на выходе насоса. Характеристика насоса в этом случае принимает вид кривой 1'. По сути это уже не характеристика насоса, а характеристика си-

Сергей Владимирович Колесников (к.т.н.), докторант кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».

Василий Александрович Кудинов (д. ф.-м. н., проф.), заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».

Анастасия Эдуардовна Кузнецова, аспирант.

Анастасия Николаевна Бранфилева, аспирант.

Марина Петровна Скворцова, аспирант.

стемы, состоящей из насоса и задвижки на его выходе. При такой работе часть энергии, развиваемой насосом, теряется бесполезно на задвижке, то есть насос работает с пониженным КПД. Кроме того, ввиду увеличения наклона характеристики системы «насос – задвижка» уменьшается рабочий диапазон насоса по расходу среды через него. Поэтому такой режим работы насоса, вообще говоря, не рекомендуется нормативными документами.

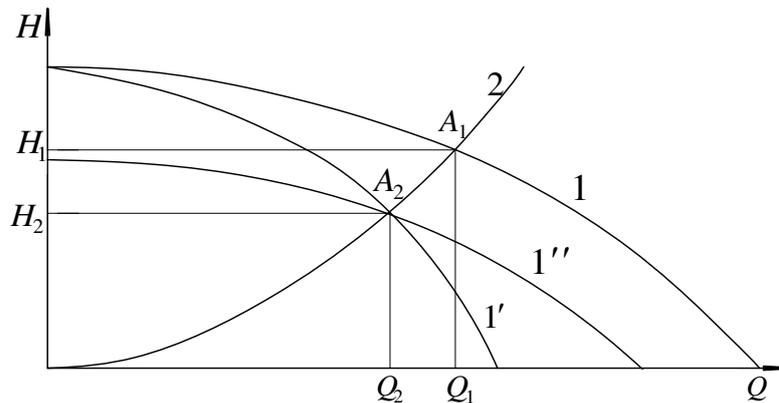


Рис. 1. Характеристика насоса и сети: 1 – характеристика насоса с полностью открытой на его выходе задвижкой; 1' – с частично прикрытой задвижкой; 1'' – с регулируемым по числу оборотов двигателем; 2 – характеристика сети

Другой путь решения этой проблемы – применение насосов с регулируемым по числу оборотов приводом. Характеристика насоса при уменьшении числа оборотов двигателя с целью уменьшения напора до величины H_2 имеет вид кривой 1'' (см. рис. 1), имеющей одинаковый угловой коэффициент с кривой 1. При уменьшении числа оборотов привода для параметров насоса выполняется соотношение [1]

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = \sqrt[3]{\frac{N_1}{N_2}}, \quad (1)$$

где n_1, n_2 – число оборотов вала насоса до и после изменения;

Q_1, Q_2 – соответствующие расходы через насос;

H_1, H_2 – развиваемые насосом напоры;

N_1, N_2 – потребные мощности.

Таким образом, применение насоса с регулируемым приводом позволяет избежать регулирования напора и расхода задвижкой на выходе насоса. Однако в этом случае возникает ряд проблем, требующих дополнительного исследования. К их числу относятся: совместная работы насоса с регулируемым приводом и параллельно соединенных с ним насосов с нерегулируемым приводом вне зоны их рабочего диапазона расходов и напоров по характеристике, то есть вне зоны, где насосы работают с максимальным КПД; работа насосов при изменяющихся расходах, но при неизменном напоре на их выходе; работа насосов в случае, когда и расход, и давление на выходе переменны.

Для получения общих закономерностей в настоящей работе представлены результаты исследований поставленных выше задач на примере расчета теплосети, состоящей из двух насосов (один с регулируемым приводом) и двух потреби-

телей теплоты (рис. 2), а также теплосети, состоящей из шести параллельно соединенных насосов, один из которых – с регулируемым приводом (теплосеть Самарской ТЭЦ). Исследования выполнялись на компьютерной модели, основанной на двух законах Кирхгофа [1 – 3]. Первый закон применительно к расчету гидравлических систем устанавливает равенство притока и оттока среды в каждом узле сети, то есть требуется выполнение уравнения баланса расходов

$$\sum_i^n Q_i = 0, \quad (2)$$

где n – число узлов сети;

$Q_i (i = \overline{1, n})$ – расходы среды по всем трубопроводам, соединяющимся в данном узле.

Согласно второму закону Кирхгофа сумма напоров для любого замкнутого контура равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n H_i = \sum_{i=1}^n S_i Q_i^2 = 0, \quad (3)$$

где $S_i (i = \overline{1, n})$ – гидравлическое сопротивление i -го участка;

$Q_i (i = \overline{1, n})$ – расходы среды на i -м участке.

Используя уравнения (2) и (3), на основе итеративного метода расчета находятся распределения скоростей, расходов и давлений по всем участкам сети. Регулирование числа оборотов приводного двигателя одного из насосов выполняется по формуле (1).

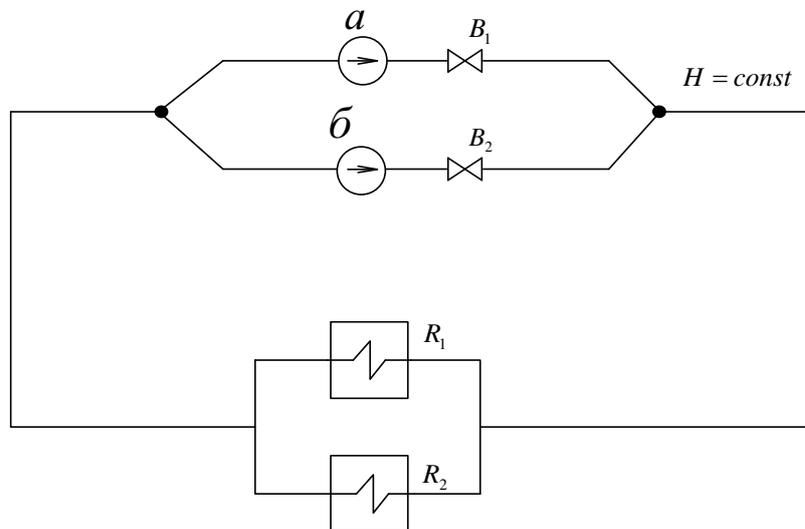


Рис. 2. Схема теплосети с постоянным давлением на тепловывводе:

$a, б$ – насосы; R_1, R_2 – потребители теплоты; B_1, B_2 – задвижки

На графиках рис. 3 даны выполненные на компьютерной модели результаты исследований представленной на рис. 2 гидравлической сети при постоянном напоре $H = const$ на выходе насосов в случае их работы на единую сеть с переменным сопротивлением. Здесь: 1 – характеристика насоса с нерегулируемым приводом, которая также является характеристикой исходного состояния насоса с регулируемым приводом (n_1 – число оборотов в исходном состоянии); 2, 3, 4, 5,

6, 7 – характеристики насоса с регулируемым приводом в зависимости от числа оборотов (n_1, n_2, \dots, n_7); 1+1, 1+2, 1+4, 1+5, 1+6, 1+7 – суммарные характеристики насосов с регулируемым и нерегулируемым приводом при различном числе оборотов насоса с регулируемым приводом; 1', 2', 3', ..., 9' – характеристики внешней сети при различных ее сопротивлениях.

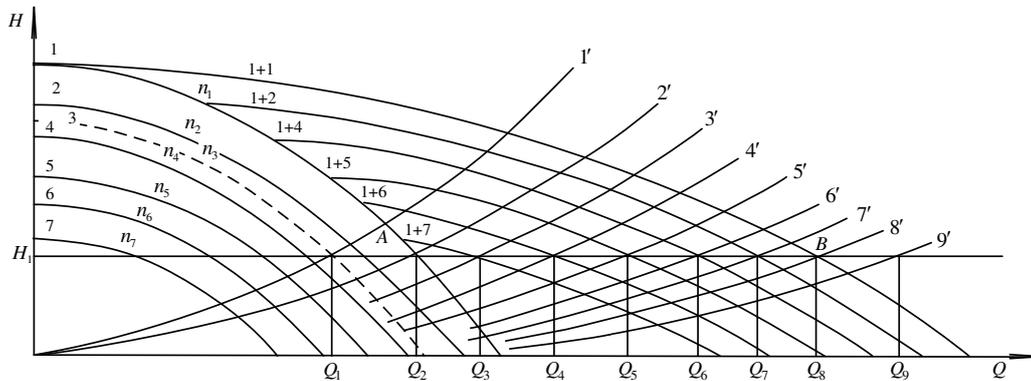


Рис. 3. Совместная работа двух насосов (один с регулируемым приводом) при постоянном напоре на их выходе на единую сеть с переменным сопротивлением

Предположим, что напор H_1 на выходе из насосов поддерживается постоянным вне зависимости от сопротивления внешней сети. Проведем анализ изменения расхода и возможностей его обеспечения с помощью двух параллельно соединенных насосов в зависимости от сопротивления внешней сети. Этот анализ позволяет заключить, что диапазон расходов, которые можно обеспечить с помощью двух насосов при напоре $H_1 = \text{const}$, при различных сопротивлениях внешней сети находится в пределах от Q_2 до Q_8 . При этом расход Q_2 может обеспечить лишь один насос, работающий по характеристике 1 (характеристика сети 2'). Расход Q_8 (при характеристике сети 8') обеспечивается работой двух насосов, причем оба должны иметь характеристики 1. Любые промежуточные (между Q_2 и Q_8) расходы обеспечиваются изменением числа оборотов насоса с регулируемым приводом.

При большом сопротивлении сети (характеристика 1') при данном напоре $H_1 = \text{const}$ расход Q_1 становится настолько мал, что он может быть обеспечен работой одного насоса с регулируемым приводом. Этот насос должен работать по характеристике 3 с числом оборотов n_3 .

При каком-то очень малом сопротивлении сети (характеристика сети 9') расход при данном напоре H_1 становится столь велик, что для его обеспечения недостаточно двух насосов, работающих по характеристике 1. В этом случае необходимо включать дополнительные насосы.

Рассмотрим случай, когда параллельно с изменением напора происходит также изменение расхода на выходе насосов.

На графиках рис. 4, 5 дано распределение расходов при совместной работе двух насосов (из которых насос a – с регулируемым приводом) на общую теплосеть, состоящую из двух тепловыводов 1 и 2. На этих графиках приведены расходы при работе насосов на сеть, имеющую соответственно большое (рис. 4) и малое (рис. 5) гидравлическое сопротивление. Здесь рассмотрен случай, когда число оборотов двигателя насоса a снижается настолько, что его характеристика

принимает вид кривой $1'$. Суммарная характеристика насосов a и b будет иметь вид кривой $1+1'$, где 1 – характеристика насоса с нерегулируемым приводом, а также насоса с регулируемым приводом в исходном состоянии (до момента начала регулирования насосы имеют одинаковую производительность).

Анализ графиков рис. 4 позволяет заключить, что при достаточно высоком сопротивлении внешней сети с уменьшением числа оборотов насоса a (до величины, соответствующей характеристике $1'$) по сравнению с исходным состоянием (когда насос a имел характеристику 1) происходит уменьшение его подачи на величину $Q_2 - Q'_1$. Подача насоса b с нерегулируемым приводом, имеющего характеристику 1 , при этом увеличивается на величину $Q'_2 - Q_2$. Причем уменьшение подачи насоса $Н1$ оказывается бóльшим, чем увеличение подачи насоса b , на величину $Q'_3 - Q_3 = (Q_2 - Q'_1) - (Q'_2 - Q_2)$. Величина $Q'_3 - Q_3$ в данном случае представляет уменьшение подачи двух параллельно работающих насосов во внешнюю сеть при изменении числа оборотов одного из них.

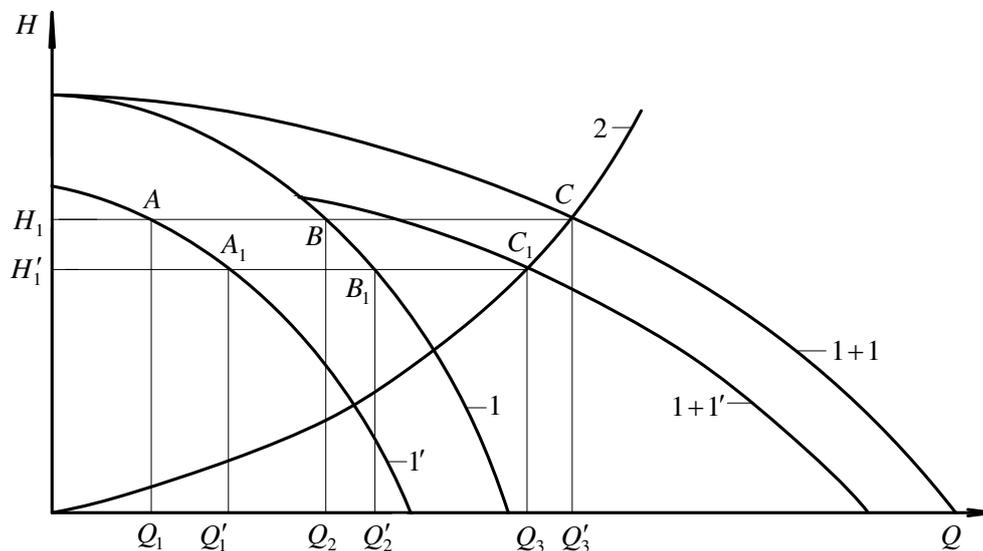


Рис. 4. Совместная работа двух насосов на единую сеть с большим гидравлическим сопротивлением (см. рис. 2):

1 – характеристика насоса с нерегулируемым приводом; $1'$ – с регулируемым приводом; 2 – характеристика сети; $1+1$ – суммарная характеристика двух одинаковых параллельно работающих насосов, имеющих характеристику 1 ; $1+1'$ – суммарная характеристика двух параллельно работающих насосов, имеющих характеристики 1 и $1'$

На рис. 5 приведены результаты для случая, когда сопротивление внешней сети меньше, чем сопротивление сети, расходные характеристики которой даны на рис. 4. При этом считаем, что число оборотов двигателя насоса a уменьшено на ту же самую величину, что и в варианте, приведенном на рис. 4. Анализ результатов позволяет заключить, что суммарная подача в сети при переходе насоса a на пониженное число оборотов уменьшилась на величину $Q'_3 - Q_3$, которая больше, чем аналогичная величина для варианта сети, характеристики которой приведены на рис. 4.

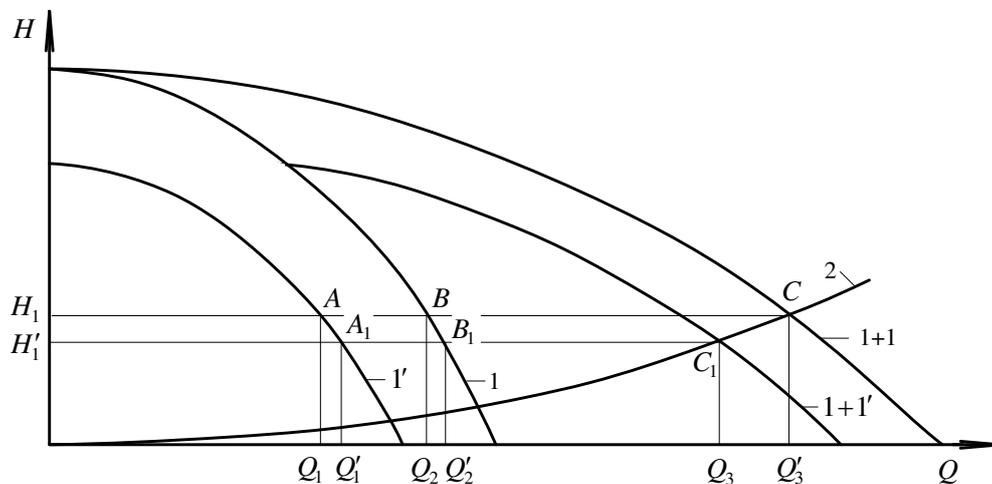


Рис. 5. Совместная работа двух насосов на единую сеть с малым сопротивлением (см. рис. 2)

Изложенные выше результаты позволяют сделать следующие выводы:

- при уменьшении числа оборотов привода насоса a одновременно с уменьшением расхода и давления на его выходе происходит возрастание расхода насоса b с нерегулируемым приводом. При этом уменьшение расхода насоса a оказывается большим, чем увеличение расхода насоса b , и, следовательно, суммарный расход в сети уменьшается;

- уменьшение суммарного расхода во внешней сети при одном и том же уменьшении числа оборотов регулируемого привода оказывается тем большим, чем меньше сопротивление сети;

- подача насоса b с нерегулируемым приводом при изменении сопротивления внешней сети изменяется. Причем возрастание расхода насоса b при уменьшении числа оборотов насоса a тем больше, чем выше сопротивление внешней сети. При уменьшении сопротивления внешней сети увеличение подачи насоса b становится меньшим (при неизменном числе оборотов насоса a), следовательно, роль насоса b в регулировании суммарной подачи уменьшается;

- при использовании в системе нескольких параллельно соединенных насосов одного насоса с регулируемым приводом экономия затрачиваемой мощности при уменьшении числа оборотов имеет место только на этом насосе. Расход на всех насосах с нерегулируемым приводом при этом возрастает. Следовательно, рабочая точка на их характеристиках смещается вправо (в сторону больших расходов). При этом если она не выходит за пределы рабочей зоны, рекомендуемой паспортными данными этих насосов, то экономичность их работы, по меньшей мере, не снижается. Для получения количественных характеристик необходимо выполнять расчет для каждого отдельного, конкретного случая.

Один насос с регулируемым приводом, установленный в группе параллельно работающих насосов, позволяет выполнять регулирование расхода теплоносителя в сети в диапазоне расхода, развиваемого данным насосом. При этом экономия мощности при использовании насоса с регулируемым приводом по срав-

нению с регулированием задвижкой зависит от величины расхода через него. В связи с этим можно построить кривую экономии мощности (электроэнергии на привод насоса) в зависимости от расхода через насос.

Конкретный пример кривой экономии мощности дан на рис. 6. Кривая построена для случая системы, состоящей из шести параллельно работающих насосов СЭ-2500-130, один из которых – с регулируемым приводом. Расчеты выполнялись на компьютерной модели теплосети Самарской ТЭЦ [2].

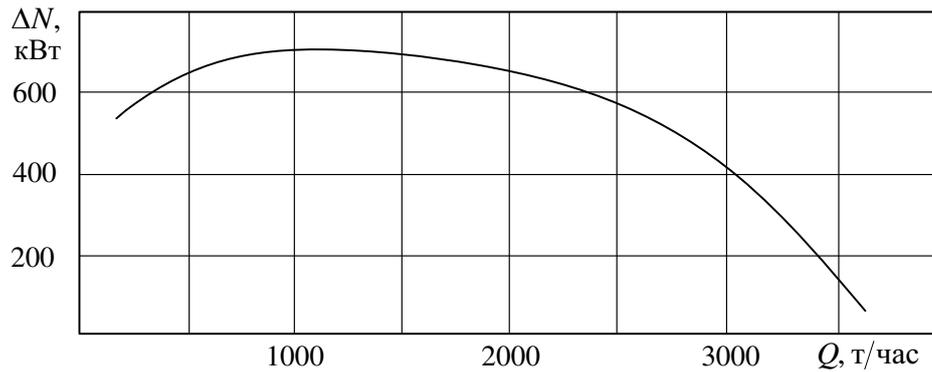


Рис. 6. График зависимости экономии мощности ΔN от расхода насоса с регулируемым приводом

В табл. 1, 2 представлены результаты исследований, полученные для двух вариантов регулирования расхода – задвижкой на выходе одного из насосов (табл. 1) и регулируемым приводом для этого же насоса (табл. 2). Параметром, относительно которого выполнялось регулирование, являлось давление на выходном коллекторе, которое в процессе работы поддерживалось постоянным и равным 145 м вод. ст.

Таблица 1

Регулирование задвижкой

| Фактическое число оборотов в мин | Полезно используемая мощность, кВт | Вся затрачиваемая мощность, кВт | Напор на входе, м | Напор на выходе до регулирующей задвижки, м | Расход, м ³ /час | Потеря мощности на задвижке, кВт | Суммарный расход в сети, м ³ /час |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|---|-----------------------------|----------------------------------|--|
| 3000 | 971 | 1197 | 56 | 276 | 1641 | 715 | 21060 |
| 3000 | 1193 | 1417 | 53 | 244 | 2316 | 624 | 21570 |
| 3000 | 1225 | 1600 | 49 | 198 | 3072 | 485 | 22110 |
| 3000 | 1032 | 1600 | 47 | 152 | 3686 | 64 | 22560 |
| 3000 | 120 | 710 | 63 | 310 | 180 | 568 | 20010 |

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что максимальная экономия мощности наблюдается в диапазоне расходов от 500 до 2500 т/час.

Результаты выполненных в настоящей работе исследований качественно согласуются с результатами, полученными в публикации [4] применительно к насосам типа 14НДс.

Таблица 2

Регулирование числом оборотов привода

| Фактическое число оборотов в мин | Полезно используемая мощность, кВт | Вся затрачиваемая мощность, кВт | Напор на входе, м | Напор на выходе, м | Расход, м ³ /час | Экономия мощности, кВт | Суммарный расход в сети, м ³ /час |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|--|
| 1040 | 404 | 482 | 56 | 147 | 1680 | 715 | 21060 |
| 1160 | 570 | 739 | 53 | 146 | 2317 | 624 | 21570 |
| 1330 | 787 | 1115 | 49 | 146 | 3068 | 485 | 22110 |
| 1480 | 971 | 1536 | 47 | 146 | 3678 | 64 | 22560 |
| 860 | 39 | 142 | 63 | 146 | 179 | 568 | 20010 |

Отметим, что регулирование переменного расхода в сети (задвигкой или путем применения регулируемого привода) при постоянном напоре на выходном коллекторе, объединяющем выходные трубопроводы всех параллельно соединенных насосов, выполняется лишь на одном из этих насосов. При этом диапазон регулирования расхода в сети ограничивается максимальной подачей насоса, с помощью которого выполняется регулирование. При колебаниях расхода в сети, превышающих эту величину, необходимо либо выключать один из работающих насосов с нерегулируемым приводом (при уменьшении расхода в сети, превышающем диапазон регулирования), либо включать дополнительный насос с нерегулируемым приводом (при соответствующем увеличении расхода в сети). Дальнейшие изменения расхода в сети регулируются насосом с регулируемым приводом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 360 с.
2. Панамарев Ю.С., Кудинов В.А., Чиликин Ю.П., Котов В.В. Расчет гидравлических и температурных режимов работы теплосети Самарской ТЭЦ с помощью компьютерной модели // Теплоэнергетика. – 2005. – № 5. – С. 35-39.
3. Кудинов В.А., Коваленко А.Г., Колесников С.В., Панамарев Ю.С. Разработка компьютерной модели и исследование работы циркуляционной системы Новокуйбышевской ТЭЦ-2 // Известия АН. Энергетика. – 2001. – № 6. – С. 118-124.
4. Мягков Ф.Н., Костырев М.Л., Дубаев А.И., Мотовилов Н.В. Моделирование насосов с регулируемой частотой вращения // Электрические станции. – 2009. – № 6. – С. 54-58.

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2013 г.

USING COMPUTATIONAL MODEL FOR INVESTIGATION OF COMBINED ACTION OF PUMPS WITH THE CONTROLLED AND NONCONTROLLED DRIVE

S.V. Kolesnikov, V.A. Kudinov, A.E. Kuznetsova, A.N. Branfileva, M.P. Skvortsova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Result of the investigations of combined action of pumps received on computational model with the controlled and uncontrolled drive are given. The curve of saving of power depending on the expenditure via the pump with the controlled drive working as a part of group of pumps with uncontrolled drives is constructed. For pump with controlled drive was received the range of costs, in where is the maximum power sawing. This pump is one of the six working parallely in one sistem. Shown that for regulation of the variable rate on the network at a constant pressure at the output collector, uniting outlet pipes of all pumps connected in parallel, it is enough to install variable speed drive is only one of the pumps.

Keywords: *Kirchhoff's laws, pump characteristics curve, hydraulic circuit characteristics, controlled drive, curve of saving of power.*

*Sergey V. Kolesnikov (Ph.D. (Techn.)), Doctoral Student.
Vasiliy A. Kudinov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anastasiya E. Kuznetsova, Postgraduate Student.
Anastasiya V. Branfileva, Postgraduate Student.
Marina P. Skvortsova, Postgraduate Student.*