

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 697.326-5

*АРТАМОНОВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
p.artamonovv@yandex.ru
БЫСТРОВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА, магистрант,
КОРОВИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ, магистрант,
ЯРОСЛАВЦЕВА МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА, магистрант,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38*

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВОГО КОНТУРА КОТЕЛЬНОЙ

Разработаны трёхмерные модели наиболее распространённых схем организации котлового контура котельной, работающей по независимой схеме теплоснабжения. Получена гидравлическая характеристика каждой схемы. Приведены результаты расчета основных технико-экономических показателей рассмотренных схем: энергопотребление, металлоемкость, капитальные затраты, эксплуатационные затраты. По результатам проведенного анализа предложено техническое решение по снижению электропотребления насосного оборудования котлового контура котельной. Дана комплексная оценка рассмотренных вариантов с точки зрения производителя котельной и эксплуатирующей организации, рассчитана инвестиционная привлекательность.

Ключевые слова: котельная; котловой контур; циркуляционный насос; энергоэффективность.

*PAVEL A. ARTAMONOV, PhD, A/Professor,
p.artamonovv@yandex.ru
ELENA V. BYSTROVA, Undergraduate Student,
ALEKSANDR A. KOROVIN, Undergraduate Student,
MARIYA A. YAROSLAVTSEVA, Undergraduate Student,
Tyumen State Oil and Gas University,
38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen', Russia*

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF BOILER CIRCUIT

The paper presents three-dimensional models of the most common layouts of boiler circuits with the autonomous system of heat supply. The hydraulic characteristic of each layout is ob-

tained. Calculation results of the main performance indicators are obtained for these layouts, namely: energy and metal consumption, capital and operating costs. It is suggested to reduce energy consumption of pumping equipment in the boiler circuit. A complex estimation of considered variants is given from the viewpoints of the boiler station manufacturer and operating organization. Also, the investment potential is calculated herein.

Keywords: boiler station; boiler circuit; recycling pump; energy efficiency.

В настоящее время большое внимание уделяется энергосбережению и повышению энергетической эффективности. Во всем мире принимаются законы, стратегии, программы, которые направлены на стимулирование рационального использования энергетических ресурсов. В России главным законом в области повышения энергоэффективности является Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», принятый в 2009 г. Исходя из необходимости рационального использования энергетических ресурсов, разрабатываются новые технологии, внедряется энергосберегающее оборудование, что приводит к экономии энергетических ресурсов [1].

Один из первоначальных этапов проектирования котельной – это выбор принципиальной схемы, которая определяет режим работы и алгоритмы управления компонентами котельной. Оптимизация тепловых и гидравлических режимов работы внутри котельной является одним из инструментов повышения ее энергоэффективности [2]. Таким образом, разработка новых принципиальных схем работы котельных и улучшение существующих путем изменения логики управления и организации работы оборудования является актуальной задачей теоретических и практических исследований. Цель статьи – разработка способа повышения энергоэффективности котлового контура котельной.

Рассмотрим два наиболее распространённых в настоящее время варианта организации котлового контура котельной, работающей по независимой схеме теплоснабжения. Данные варианты будут рассмотрены на примере котельной с установленной тепловой мощностью 9 МВт (3 котла марки КСВ-3,0 производства «МАКСТЕРМ»), с пластинчатым теплообменником марки НН-62-16/3-167-ТКТМ32 производства «Ридан» (контур системы отопления) и марки НН-42-16/1-33-ТКТМ25 производства «Ридан» (контур системы горячего водоснабжения – ГВС) мощностью 6 и 3 МВт соответственно. Температура в подающем трубопроводе котлового контура равна 105 °С, в обратном – 80 °С.

Первый вариант представляет собой котловой контур с установкой насосов на обратном трубопроводе непосредственно у каждого котла (рис. 1, а). В этом случае каждый насос работает с одним котлом и включается при его запуске. Управление включением котлов происходит в каскадном режиме, а количество отданного тепла потребителю регулируется трехходовыми клапанами 5.

Во втором варианте управление мощностью котельной и изменение количества отданного потребителям тепла осуществляется по аналогии с первым, но котловые насосы установлены на общем обратном трубопроводе (рис. 1, б). При этом для предотвращения циркуляции теплоносителя через неработающий котел предусмотрена запорная арматура с электроприводом 6.

С точки зрения эксплуатации вторая схема выглядит более надежной, т. к. размещение насосов на общей линии дает возможность работы всех котлов даже при поломке одного насоса. С другой стороны, данное преимущество ведет к усложнению обвязки и алгоритма управления за счет появления дополнительных элементов.

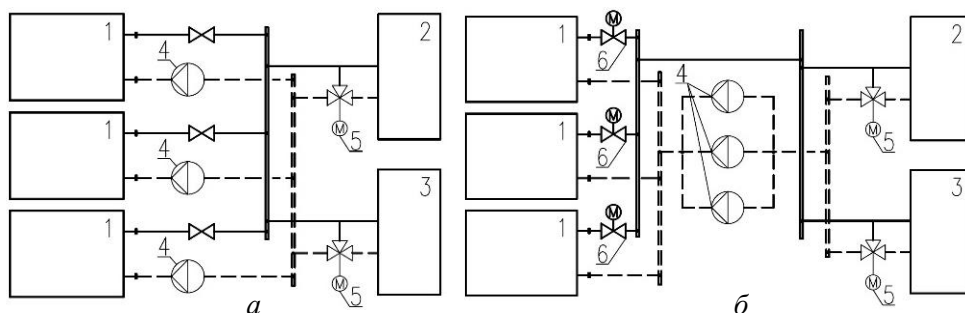


Рис. 1. Принципиальные схемы котлового контура:

a – вариант 1; *б* – вариант 2; 1 – котёл мощностью 3 МВт; 2 – теплообменник системы отопления; 3 – теплообменник системы ГВС; 4 – циркуляционный насос котлового контура; 5 – трёхходовой клапан; 6 – задвижка с электроприводом

Для проведения комплексного сравнения с учетом требований нормативно-технической документации были разработаны две трёхмерные модели котлового контура (рис. 2, 3), соответствующие принципиальным схемам работы, показанным на рис. 1.

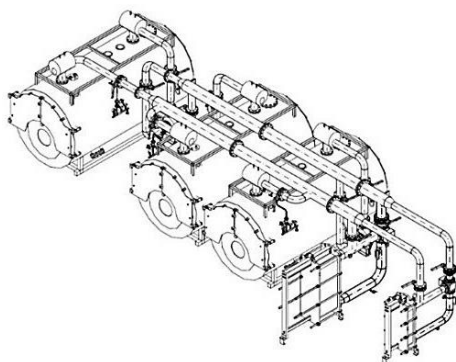


Рис. 2. Трёхмерная модель, разработанная согласно принципиальной схеме варианта 1

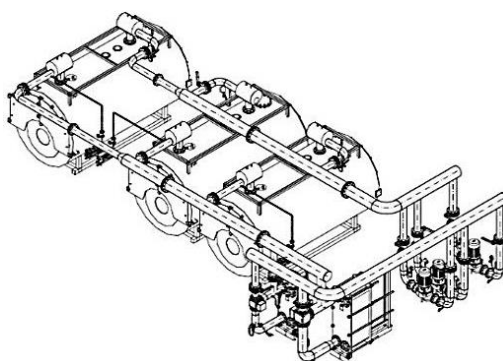


Рис. 3. Трёхмерная модель, разработанная согласно принципиальной схеме варианта 2

На основании разработанных моделей был произведен гидравлический расчет каждой схемы при трёх основных режимах работы:

- режим № 1 – в работе находится один котёл;
- режим № 2 – в работе находятся два котла;
- режим № 3 – в работе находятся три котла.

Каждый режим соответствует определённому расходу в котловом контуре. При заданной разности температур на подающем и обратном трубопро-

воде, равной 25 °С, средней удельной теплоемкости теплоносителя, равной 4,19 кДж/(кг·°С), и плотности, равной 963,85 кг/м³, расчетный расход на один котел будет равен 103 м³/ч. Расход в котловом контуре при режимах работы № 1, 2, 3 будет равен 103, 206, 309 м³/ч соответственно.

Потери напора по длине трубопроводов определялись по уравнению Дарси – Вейсбаха, потери в местных сопротивлениях определялись по уравнению Вейсбаха [3]. Коэффициенты местного сопротивления приняты согласно [4]. Потери на оборудовании (заслонки, обратные и трехходовые клапаны, воздухоотборники и т. д.) определялись из коэффициента пропускной способности, указанного в паспорте производителя. Результаты гидравлического расчёта представлены в табл. 1. По полученным значениям расходов и потерь давления был осуществлен подбор насосного оборудования (табл. 1).

Таблица 1

Результаты гидравлического расчёта

№ варианта	Потери давления, м вод. ст.			Марка выбранного насоса
	Режим № 1	Режим № 2	Режим № 3	
Вариант 1	8,77	9,34	9,94	WILO BL 125/185-5,5/4
Вариант 2	9,14	9,7	10,77	WILO IL 125/210-5,5/4

В зависимости от погодных условий потребителям требуется разное количество тепловой энергии, поэтому одной из основных задач энергоэффективности котельных является точное регулирование количества произведенного тепла, т. е. минимизация эффекта «перетопа» [5]. По методике, изложенной в СП 41-104-2000 «Проектирование автономных источников теплоснабжения», произведём расчёт потребляемой тепловой мощности в течение года при среднемесячной температуре наружного воздуха для г. Тюмени. Климатические параметры приняты согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология». По результатам расчета определен режим работы котельной в различные периоды года. В период с апреля по октябрь для обеспечения необходимого количества тепла потребителю котельная работает в режиме № 1. С октября по март включительно – в режиме № 2. Выход котельной в режим работы № 3 осуществляется локально для обеспечения пиковых нагрузок. Регулирование тепловой мощности котла осуществляется за счет модуляции пламени в горелке, а регулирование отданного тепла потребителям, как отмечалось ранее, осуществляется трехходовым клапаном. На основании полученного значения годового теплопотребления рассчитано годовое электропотребление. Для первого варианта (рис. 1, а) оно составило 64 215,43 кВт·ч, для второго (рис. 1, б) – 68 791,9 кВт·ч. Более высокое электропотребление второго варианта связано с особенностями обвязки (рис. 3), конфигурация которой увеличивает сопротивление в котловом контуре при равных расходах (табл. 1). Таким образом, схема организации котлового контура по второму варианту характеризуется большим энергопотреблением, а значит, и большими эксплуатационными затратами.

Как уже было отмечено, регулирование тепловой мощности котлов обеспечивается за счет модуляции пламени. То есть при работе котельной

в первом режиме и диапазоне регулирования мощности за счет модуляции пламени от 40 до 100 % мощность котла может изменяться от 1200 до 3000 кВт. Вместе с этим расход через котел остается постоянным, вне зависимости от мощности, с которой работает горелка. Таким образом, пренебрегая колебаниями рабочей точки насоса при изменении положения трехходового клапана, можно утверждать, что электропотребление котловыми насосами при каждом режиме работы остается неизменным.

Перспективным направлением снижения электропотребления насосных установок и, как следствие, сокращения эксплуатационных затрат, является регулирование расхода теплоносителя в котловом контуре изменением частоты вращения рабочего колеса насосов при изменении числа оборотов вала электродвигателя насоса [6–8].

Авторами статьи предложена схема работы котлового контура с частотным управлением насосами (вариант 3). Данная схема (рис. 4) отличается от второго варианта наличием расходомера 9, датчиков температуры 7 и частотного преобразователя 8 (рис. 4). Трехмерная модель, за исключением установленного расходомера, полностью аналогична варианту 2 (рис. 3). На основании гидравлического расчета был выбран насос марки IL 100/220-5,5/4 производства Wilo. Более производительный насос выбран с учетом повышения гидравлического сопротивления в котловом контуре при установке расходомера.

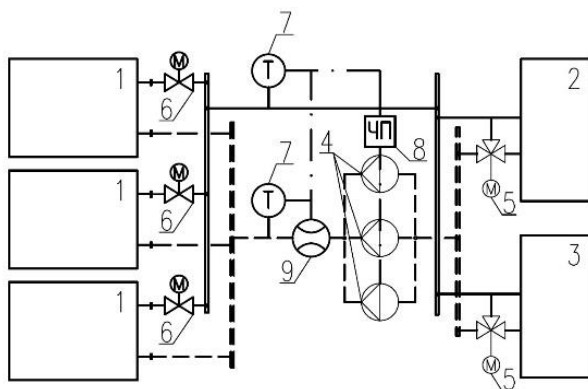


Рис. 4. Вариант принципиальной схемы котлового контура с частотным управлением насосов:

1–6 – аналогично рис. 1; 7 – датчик температуры; 8 – частотный преобразователь; 9 – расходомер

Изменение частоты вращения электродвигателя насоса осуществляется по следующему алгоритму: контроллер управления котельной на основании параметров теплоносителя сетевого контура и графика зависимости температуры подающего трубопровода на выходе из котельной от наружной температуры воздуха вычисляет требуемое значение тепловой мощности котельной. По данным расходомера и датчиков температуры контроллер вычисляет фактическое значение тепловой мощности котельной. Разность данных значений должна быть близкой или равной нулю. В случае, если разность больше нуля, т. е. значение вырабатываемой тепловой энергии больше требуемого, кон-

троллер посылает сигнал на снижение частоты вращения электродвигателя насоса. В случае, если разность меньше нуля, то в частотный преобразователь должен поступать сигнал о повышении частоты. Для исключения скачкообразного изменения расхода логика управления должна включать пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор [9, 10]. Параллельно с этим должно осуществляться плавное регулирование тепловой мощности котлов и их каскадное включение. Требуемое значение перепада температур на датчиках выставляется константой. В противном случае насосы будут компенсировать низкий перепад температур за счет увеличения расхода, что приведет к перерасходу электроэнергии.

Данный алгоритм управления котловым контуром при заданном значении перепада температур на подающем и обратном трубопроводе котлового контура, равном 25 °С, позволит осуществить изменение расхода теплоносителя пропорционально изменению тепловой нагрузки потребителей. На основании значений среднемесячной тепловой мощности котельной произведен расчет электропотребления. Результаты расчета приведены на рис. 5. Годовое электропотребление для третьего варианта на основании расчета составило 21 264 кВт·ч.

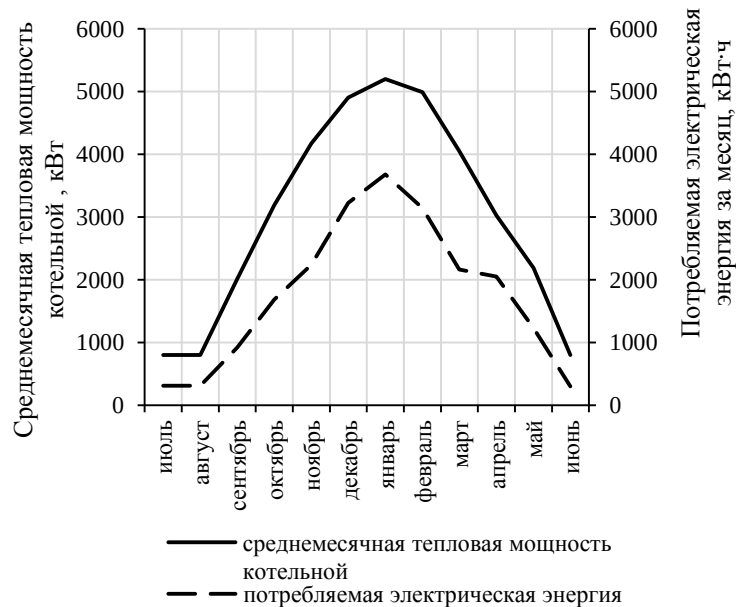


Рис. 5. Потребляемая тепловая и электрическая энергия

Как видно из полученных результатов, организация работы котлового контура по предложенному способу позволяет снизить годовое потребление электроэнергии в 3,23 раза (на 47 527,9 кВт·ч) по сравнению с вариантом 2 и в 3,02 раза (на 42 951,43 кВт·ч) по сравнению с вариантом 1.

Для окончательной оценки рассматриваемых вариантов организации работы котлового контура котельной проведем анализ инвестиционной привлекательности. Для этого сравним сроки окупаемости всех вариантов схем.

При расчёте суммы капитальных затрат учитывается только стоимость насосного оборудования, компонентов и материалов его обвязки. Прочие статьи капитальных затрат (затраты на монтаж, транспортные расходы, заготовительно-складские расходы и пр.) принимаются равными для всех вариантов, что позволяет их не учитывать. Стоимость оборудования принята согласно прайс-листу производителей. Капитальные вложения и затраты на электроэнергию, потребленную котловыми насосами, при реализации одного из трех вариантов схемы котлового контура представлены в табл. 3. Для расчётов принят тариф на электроэнергию 2,5 руб./кВт·ч.

Таблица 3

**Капитальные вложения и затраты на электроэнергию,
потребленную котловыми насосами**

№ варианта	Капитальные вложения, тыс. руб.	Затраты на электроэнергию, потребленную котловыми насосами, тыс. руб./год
Вариант 1	781,78	160,54
Вариант 2	972,19	171,98
Вариант 3	1000,94	53,16

Прибыль рассчитывается исходя из количества отпускаемой теплоты за рассматриваемый период. Для расчётов принят тариф на тепловую энергию 1318,73 руб./Гкал. Условно, допустив ряд упрощений, таких как отсутствие инфляции, отсутствие периодов до ремонта и прочее, был получен график срока окупаемости (рис. 6).

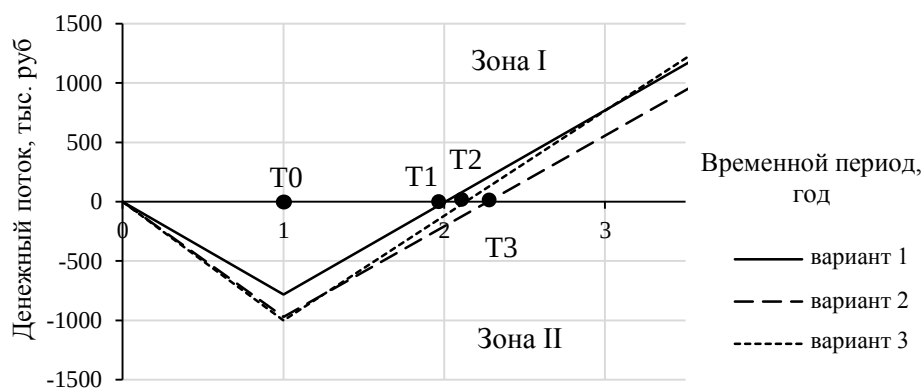


Рис. 6. Срок окупаемости

Отрезок времени по оси абсцисс $[0, T_0]$ — это период капитальных вложений, для наглядности задаем периодом 1 год. Далее начинается период эксплуатации. Зона II (область ниже оси абсцисс) характеризует затраты эксплуатирующей организации, связанные с покупкой оборудования: насосов, трубопроводов, запорной арматуры котлового контура. Точка пере-

сечения соответствующей функции с осью абсцисс (точки T_1 , T_2 , T_3) характеризует период конца срока окупаемости. Время нахождения графика в зоне I характеризует период времени, который данное техническое решение приносит прибыль. Таким образом, сроки окупаемости схем по варианту 1, 2, 3 будут соответствовать временным отрезкам $[T_0, T_1]$, $[T_0, T_3]$ и $[T_0, T_2]$ соответственно.

Срок окупаемости для варианта работы котлового контура 1, 2 и 3 составляет 2, 2,3 и 2,13 года соответственно, т. е. первый вариант организации котлового контура имеет наименьший срок окупаемости из-за более низких капитальных затрат (табл. 3).

Третий вариант, даже с учетом самых высоких капитальных затрат (табл. 3), после первого года с начала эксплуатации превысит суммарную прибыль, получаемую при использовании второго варианта, и через три года становится самым доходным из всех рассмотренных вариантов работы котлового контура котельной. Конечно, при изменении расчетных условий срок окупаемости также будет изменяться, но общая структура и выводы, полученные на основании рис. 6, останутся постоянными для рассмотренных вариантов работы котлового контура.

Итоговое сравнение рассматриваемых вариантов представлено в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение основных параметров рассматриваемых вариантов

Параметры	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Капитальные затраты, тыс. руб.	781,78	972,19	1000,94
Затраты на электроэнергию, потребленную котловыми насосами, тыс. руб./год	160,54	171,98	53,16
Металлоёмкость системы, кг/МВт	210,47	256,1	259,82
Срок окупаемости, год	2	2,3	2,13

Выводы

С точки зрения поставщика и производителя котельных, наиболее выгодным выглядит первый вариант организации работы котлового контура. Данное техническое решение характеризуется простотой алгоритма управления котельной и имеет наименьшие капитальные затраты, срок окупаемости и металлоёмкость. Однако данная схема обладает рядом недостатков: жёсткая связь котёл-насос делает невозможным работу всех котлов при выходе из строя одного насоса, электропотребление котлового насоса остается условно постоянным для всего мощностного диапазона работы котла, для обеспечения горячего резерва котла требуется установка дополнительного оборудования.

Второй вариант работы котлового контура с экономической точки зрения является наименее привлекательным, т. к., обладая большими требованиями к капитальным вложениям, он не может обеспечить сравнительно высокие эксплуатационные характеристики котельной. Однако в данной схеме

присутствует возможность горячего резерва котла без добавления дополнительных технических элементов и возможна работа всех котлов при поломке одного из насосов.

С точки зрения эксплуатирующей организации и обеспечения энергоэффективности наилучшим является предложенный способ организации работы котлового контура. Несмотря на то, что капитальные вложения на реализацию этого варианта работы котлового контура являются самыми высокими, данная схема обладает наименьшими эксплуатационными затратами и обеспечивает наибольшую энергоэффективность. При этом все перечисленные преимущества второго варианта организации работы котлового контура сохраняются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Повышение энергетической эффективности котельной путем оптимального распределения нагрузки между котлоагрегатами* / Б.М. Низамеев, В.К. Ильин, Д.А. Рыжов, Л.А. Русинов // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2016. – № 34. – С. 99–102.
2. *Нехода, С.Б. Технологическая схема энергоэффективной котельной* / С.Б. Нехода // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2011. – № 2. – С. 52–53.
3. *Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости)* / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1965. – 273 с.
4. *Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. Ч. 1. Отопление* / В.Н. Богословский, Б.А. Крупнов, А.Н. Скани [и др.] ; под ред. И.Г. Старовойтова, Ю.И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1990. – 344 с.
5. *Сулейманов, А.М. Что влияет на окупаемость мини-ТЭЦ?* / А.М. Сулейманов // Трубопроводный транспорт. – 2016. – С. 381–382.
6. *Кожухова, А.В. Применение ЧПР для повышения энергоэффективности насосной установки* / А.В. Кожухова, К.Н. Рамазанов // Символ науки. – 2016. – № 11-3/2016. – С. 95–97.
7. *Bujak, J. Optimal control of energy losses in multi-boiler steam system* / J.Bujak // Energy. – 2009. – V. 34. – I. 9. – P. 1260–1270.
8. *Амиров, Ф.А. Регулирование режима работы центробежного насоса изменением частоты вращения электродвигателя с целью энергосбережения* / Ф.А. Амиров, С.А. Агаммедова // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2012. – № 4/2012. – С. 34–35.
9. *Quevedo, J. Digital control: past, present and future of PID control* / J. Quevedo, T. Escobet // Proceedings of the IFAC Workshop, Eds., Terrassa, Spain, 5–7 Apr. 2000.
10. *Astrom, K.J. Advanced PID control* / K.J. Astrom, T. Hagglund. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. – 460 p.

REFERENCES

1. *Nizameev B.M., Il'in V.K., Ryzhov D.A., Rusinov L.A. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti kotel'noi putem optimal'nogo raspredeleniya nagruzki mezhdru kotloagregatami* [Energy efficiency improvement of boiler station using optimum load distribution between boilers]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta*. 2016. No. 34. Pp. 99–102. (rus)
2. *Nekhoda S.B. Tekhnologicheskaya skhema energoeffektivnoi kotel'noi* [Flow chart of energy-efficient boiler station]. *Santekhnika, otopenie, konditsionirovanie*. 2011. No. 2. Pp. 52–53. (rus)
3. *Al'tshul' A.D. Kiselev P.G. Gidravlika i aerodinamika (osnovy mekhaniki zhidkosti)* [Hydraulics and aerodynamics (basics of fluid mechanics)]. Moscow: Gosizdat Publ., 1965. 273 p. (rus)
4. *Bogoslovskii V.N., Krupnov B.A., Skanavi A.N., et al. Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustroistva* [Internal sanitary-engineering installations]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1990. 344 p. (rus)

5. Suleimanov A.M. Chto vliyaet na okupaemost' mini-TETs? [What influences co-generation plant returns?]. *Truboprovodnyi transport*. 2016. Pp. 381–382. (rus)
6. Kozhukhova A.V. Ramazanov K.N. Primenenie ChPR dlya povysheniya energoeffektivnosti nasosnoi ustanovki [Energy-efficiency improvement of pumping unit]. Ufa: Simvol nauki Publ., 2016. No. 11-3. Pp. 95–97. (rus)
7. Janusz Bujak. Optimal control of energy losses in multi-boiler steam system. *Energy*. 2009 V. 34. No. 9. Pp. 1260–1270.
8. Amirov F.A., Agammedova S.A. Regulirovanie rezhima raboty tsentrobezhnogo nasosa izmeneniem chastoty vrashcheniya elektrodvigatelya s tsel'yu energosberezheniya [Operating conditions of centrifuge pump controlled by rotation frequency of electric engine]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*. 2012. No. 4. Pp. 34–35. (rus)
9. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. *Proc. IFAC Workshop*. 2000. 5–7 April, Terrassa, Spain.
10. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society). 2006. 460 p.