УДК 697:662.6/0.9:536

© В. А. Яковлев, канд. техн. наук, доцент

© И. Ю. Гилев, студент

© В. Н. Юрченко, студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: yakovlevspb@rambler.ru, gilevi@inbox.ru,
yurchenko_vova@list.ru

© М. А. Кочева, канд. техн. наук, доцент

(Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия)

E-mail: unirs@nngasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-171-178

© V. A. Yakovlev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© I. Yu. Gilev, student

© V. N. Yurchenko, student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: yakovlevspb@rambler.ru, gilevi@inbox.ru,
yurchenko_vova@list.ru

© М. А. Kocheva, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Nizhny Novgorod State University
of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia)

E-mail: unirs@nngasu.ru

ОЦЕНКА МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПАРОВЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ ДКВр-10-13, РАБОТАЮЩИХ НА ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ

THE ANALYTICAL ASSESSMENT OF HEAT CALCULATION METHODS OF DKVr-10-13 LIQUID FUELED STEAM BOILERS

Представлена аналитическая оценка методики теплового расчета котельных агрегатов двух последних редакций, разработанной институтами ВТИ и ЦКТИ. Сравнение методик выполнено с использованием авторских расчетных программ, составленных по двум последним редакциям, а сопоставление результатов было произведено, опираясь на карты режимно-наладочных испытаний парового котлоагрегата ДКВр-10-13, установленного в отопительно-производственной котельной в Санкт-Петербурге. Сравнительному анализу были подвержены основные балансовые величины и удельные показатели работы котлоагрегата ДКВр-10-13, зависимости которых представлены и проанализированы в статье.

Ключевые слова: тепловой расчет, нормативный метод, котлоагрегаты ДКВр, сравнительная оценка, методика расчета

The article presents an analytical assessment of the methodology of the last two editions for boiler units' heat calculation developed by two Russian scientific research institutes – All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI) and I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (TsKTI). The methods' comparison analysis was carried out using the author's calculation programs, compiled according to the last two editions, and the results collating was carried out based on the maps of operational tests of the DKVr-10-13 steam boiler installed in the heating and industrial boiler house in St. Petersburg. The main balance values and specific performance indicators of the DKVr-10-13 boiler unit were subjected to comparative analysis, the dependencies of which are presented and analyzed in the article.

Keywords: heat calculation, normative method, DKVr boiler units, comparative assessment, calculation method.

Большинство современных источников тепловой энергии малой и средней мощности, эксплуатирующихся как в промышленной сфере народного хозяйства, так и в жилищно-коммунальном хозяйстве, оснащены двухбарабанными водотрубными реконструированными котлами (ДКВр) с камерными топками, работающими на природном газе. Большинство таких котельных в целях

повышения надежности по бесперебойному снабжению тепловой энергией потребителей дополнительно оснащаются системами резервного топливоснабжения. В качестве резервного топлива в подавляющем большинстве подобных котельных используют топочные мазуты.

Котлоагрегаты ДКВр, серийно выпускаемые отечественной котлостроительной промышлен-

ностью, проверены временем и отлично себя зарекомендовали на объектах коммунальной и промышленной энергетики. Данные устройства способны работать как в паровом, так и в водогрейном режимах, чем подтвердили свою универсальность в сфере выработки двух различных видов теплоносителей как горячей и перегретой воды, так насыщенного и перегретого пара.

В настоящее время при строительстве новых, а также реконструкции существующих котельных проектировщики, принимая во внимание котлы ДКВр, зачастую руководствуются типовыми проектными решениями, копируя их с одних объектов на другие. Однако, реализуя такой подход в целях ускорения этапов проектирования, могут выявиться существенные проектные ошибки, связанные с несоответствием режимов работы вновь создаваемого или реконструируемого объекта проектирования с заимствованным. В целях повышения грамотности внедрения проектных решений следует иметь достаточно точное представление о влиянии режимов работы котлоагрегатов ДКВр на режимы работы системы теплоснабжения, в том числе и при использовании резервного вида топлива. Интересующие проектировщика показатели могут быть успешно получены, опираясь на методику теплового расчета котлоагрегатов (нормативный метод), разработанную ВТИ и ЦКТИ [1, 2]. Различным вопросам, решение которых рассматривалось с применением методик теплового расчета, посвящено достаточно много работ [1–15] и др.

Таким образом, перед тем как выбрать котлоагрегат и внедрять его в проектное решение, рекомендуется предварительно вычислить все режимные параметры его работы на нагрузках: от минимальной до максимальной, предусматриваемых проектом для дальнейшей эксплуатации энергетического объекта. Современные технические возможности вычислительной техники позволяют, воспользовавшись методикой теплового расчета (нормативный метод), в сжатые сроки и без особых трудозатрат составить расчетную программу в офисном редакторе *MS Excel*. С помощью составленной программы пользователь, изменяя в исходных данных нагрузку котлоагрегата, быстро и без особых усилий определяет требуемый набор основных режимных и балансовых параметров его работы. Однако на данный

момент существует несколько редакций методики теплового расчета, отличающихся по времени их создания, где два последних (второе и третье издание) в настоящее время активно используются инженерами-проектировщиками и разработчиками котельного оборудования. Последняя редакция методики теплового расчета котлоагрегатов представлена в [2], предыдущая — в [1]. Данные методики имеют ряд отличий, где последняя редакция должна более точно согласовываться с физическими законами работы котлоагрегатов, выдавая наименьшую степень расхождения результатов, полученных расчетным путем с результатами режимно-наладочных испытаний.

Отличие двух методик заключается в редакционной поправке некоторых физических зависимостей преимущественно в разделе теплового расчета топки, выполняющей в котлоагрегатах роль радиационного теплообменника. Известно, что в подавляющем большинстве конструкций паровых и водогрейных котлоагрегатов до 70 % от всей полезно передаваемой нагреваемому теплоносителю тепловой энергии усваивается лучевоспринимающими поверхностями нагрева в топке, что также подтверждается выполненными расчетами. Таким образом, расхождение искомых величин с действительностью в тепловом расчете топки может существенным образом сказаться на точности вычисления балансовых величин всех остальных теплообменных элементов, установленных по ходу движения продуктов сгорания за топкой.

Чтобы точнее определиться с выбором наиболее подходящей методики расчета и наглядно продемонстрировать степень их расхождения друг с другом, проведено сравнение всех основных балансовых величин, полученных в результате тепловых расчетов, выполненных по двум последним редакциям методики с сопоставлением их с зависимостями, заимствованными с режимных карт работы котлоагрегатов ДКВр, составленных на действующем энергетическом объекте по результатам режимно-наладочных испытаний. Для выполнения данной задачи был выбран котлоагрегат ДКВр-10-13, работающий на мазуте, установленный в отопительной котельной Санкт-Петербурга.

Для проведения теоретических исследований составлены расчетные компьютерные программы в полном соответствии с методиками теплового расчета двух последних редакций. Программы позволяют пользователю в зависимости от изменения в исходных данных фактической тепловой нагрузки котлоагрегата выполнить поверочный тепловой расчет с определением всех основных балансовых и режимных параметров его работы. Для исследования были выбраны режимы, соответствующие производительности котлоагрегата ДКВр-10-13, представленные в карте режимно-наладочных испытаний в процентах от номинальной мощности (60,6, 81, 91,6, 101,9 и 120 % соответственно). Полученные расчетным путем по обеим методикам все данные балансовых величин и режимных параметров программой были автоматически сведены в таблицу, согласно которой для наглядности представления динамики их изменения в зависимости от режимов работы котлоагрегата оформлены в виде графиков (рис. 1–6), где красными линиями отражены зависимости, вычисленные по методике второй редакции [1], синими линиями — вычисленные по методике третьей редакции [2], зелеными линиями — заимствованные с режимно-наладочной карты.

Сравнивая методики двух последних редакций, последняя (третьего издания [2]) отличается тем, что в эмпирической расчетной зависимости для вычисления действительной температуры продуктов сгорания на выходе из топki $t_{п.с}$ используется иная форма физической зависимости, уточненная расчетным значением параметра M и эффективным значением критерия радиационной поглотательной способности Бугера:

$$t_{п.с} = \frac{T_a}{M \cdot \text{B}\ddot{\text{u}}^{0,3} \left(\frac{1}{\text{Bo}} \right)^{0,6} + 1} - 273, \quad (1)$$

где $t_{п.с}$ — действительная температура продуктов сгорания на выходе из топki, °C; T_a — адиабатическая температура горения топлива, K; M — расчетный параметр, зависящий от условий теплообмена и формы температурного поля; $\text{B}\ddot{\text{u}}$ — эффективное значение критерия радиационной поглотательной способности Бугера; Bo — критерий радиационного теплообмена Больцмана.

В тепловом расчете второго издания [1] в данной формуле вместо эффективного значения критерия Бугера использовалась степень черноты топчного пространства a_τ и расчетная формула имела вид

$$t_{п.с} = \frac{T_a}{M \left(\frac{a_\tau}{\text{Bo}} \right)^{0,6} + 1} - 273, \quad (2)$$

где a_τ — эффективная степень черноты топчного пространства.

Если уравнения (1) и (2) приравнять между собой и при равенстве искомых величин температуры логически их сопоставить, получим

$$M \cdot \text{B}\ddot{\text{u}}^{0,3} = M \cdot \theta_\tau^{0,6}. \quad (3)$$

Таким образом, по уравнению (3) наглядно прослеживается разница в двух методических подходах теплового расчета топki, которые отличаются разницей методики вычисления параметра M и использования в последней ее редакции вместо a_τ эффективного значения критерия радиационной поглотательной способности.

Эффективное значение критерия Бугера как и a_τ зависит от коэффициента поглотательной способности топчной среды k , вычисление которого отличается в различных методиках.

Использование третьей редакции теплового расчета применительно к котлоагрегатам ДКВр-10-13 расчетным методом были получены зависимости режимного параметра $t_{п.с} = f(\eta_{ка})$.

При расчете действительной температуры продуктов сгорания на выходе из топki при работе котельного оборудования на мазуте с использованием формулы (1) видно, что значения отличаются в пределах 5 % от полученных по формуле (2) (см. рис. 1).

Сравнивая расчетные значения температуры продуктов сгорания на выходе из второго конвективного пакета (на входе в экономайзер) и выходе из экономайзера с данными карты режимно-наладочных испытаний видно, что величины в сравнении с расчетными отличаются и укладываются в пределах от 15 до 20 % на всей протяженности диапазона регулирования тепловой мощности котлоагрегата (см. рис. 1).

Вследствие того что расчет всех теплообменных устройств, входящих в состав котлоагрегата, в большинстве случаев выполняется последовательно их размещению по ходу движения продуктов сгорания, от точности соответствия

Рис. 1. Зависимости расчетных величин температуры продуктов сгорания на выходе из теплообменных элементов котлоагрегата $t, ^\circ\text{C}$, от его тепловой нагрузки (в процентах от номинальной) $\eta_{ка}, \%$: 1, 2 — зависимости температуры продуктов сгорания на выходе из топки t_t ; 3, 4 — зависимости температуры продуктов сгорания на выходе из первого конвективного пакета $t_{1кп}$; 5, 6, 7 — зависимости температуры продуктов сгорания на выходе из второго конвективного пакета $t_{2кп}$; 8, 9, 10 — зависимости температуры продуктов сгорания на выходе из экономайзера $t_{ут}$

предыдущих значений действительным показателям зависит точность расчетов всех последующих теплообменных устройств. Учитывая, что в топочном пространстве используется значительная часть тепловой энергии, расхождение расчетных действительных температур продуктов сгорания на выходе из последующих теплообменных устройств, установленных за топкой при использовании сравниваемых между собой методик теплового расчета, будет меньше, что прослеживается на графике (см. рис. 1).

При изменении тепловой нагрузки котлоагрегата и использовании жидкого топлива разница температур продуктов сгорания на выходе из топки между значениями при использовании двух сравниваемых методик остается практически постоянной величиной. Это объясняется следствием сильного влияния радиационной составляющей светящихся компонентов факела на расхождение между эмпирическими величинами сомножителей, представленных по разные стороны знака равенства в уравнении (3).

Удельные тепловые напряжения площади теплопередающих поверхностей топки и конвективных пакетов с экономайзером показывают расхождение расчетных значений не более 5–10 % (рис. 2).

Зависимости коэффициента полезного действия (КПД (брутто)) (см. рис. 3), тепловых потерь с уходящими газами (см. рис. 6), полученные по методикам расчета, имеют практически полное соответствие, однако в сравнении с данными режимно-наладочных карт сильно не совпадают по значениям. Это объясняется неточностью экспериментального определения величины потерь теплоты с уходящими газами.

Зависимости удельных тепловых потерь через наружные ограждения (см. рис. 6) и расхода топлива (см. рис. 4), построенных по расчетным значениям обеих методик, практически полностью совпадают по значениям с данными режимно-наладочной карты работы котлоагрегата, что позволяет сделать вывод об идентичности расчетных зависимостей.

Рис. 2. Зависимости расчетных величин средней удельной тепловой нагрузки элементов q , $\text{МДж/ч} \cdot \text{м}^2$, от $\eta_{\text{ка}}$: 1, 2 — зависимости удельного количества тепловой энергии, воспринятого лучевоспринимающими экранами топки $q_{\text{л}}$; 3, 4 — зависимости удельного количества тепловой энергии, передаваемой в первом конвективном пакете $q_{\text{кп}}$; 5, 6 — зависимости удельного количества тепловой энергии, передаваемой во втором конвективном пакете $q_{\text{кп}}$; 7, 8 — зависимости удельного количества тепловой энергии, передаваемой в экономайзере $q_{\text{э}}$; $q_{\text{э}}$, %

Рис. 3. Зависимости расчетных величин и экспериментальных значений, принятых по данным карты режимно-наладочных испытаний КГД котлоагрегата ($\eta_{\text{бр}}$, %) от $\eta_{\text{ка}}$, %: 1, 2, 3 — зависимости КГД от тепловой нагрузки котлоагрегата

Присутствует существенная разница в изменении величин присосов воздуха в сравнении с расчетными значениями с данными режимно-наладочной карты котлоагрегата ДКВр-10-13, однако эта разница имеет резкий рост значений при снижении нагрузки котлоагрегата. При ра-

боте котлоагрегата с нагрузкой, близкой к номинальной, величины присосов воздуха практически полностью совпадают с нормативными значениями. Такое явление объясняется ростом разряжения в топке котлоагрегата при снижении

Рис. 4. Зависимости расчетных величин и экспериментальных значений, принятых по данным карты режимно-наладочных испытаний котлоагрегата величины расчетного расхода топлива $B_p, \text{м}^3/\text{ч}$, от $\eta_{к.а}, \%$: 1, 2, 3 — зависимости расхода топлива от тепловой нагрузки котлоагрегата

Рис. 5. Зависимости расчетных величин и экспериментальных значений, принятых по данным карты режимно-наладочных испытаний котлоагрегата величин присосов воздуха в газоходы котлоагрегата α от $\eta_{к.а}, \%$: 1, 2, 3 — зависимости коэффициента избытка воздуха на выходе из второго конвективного пакета $\alpha_{2кп}$; 4, 5, 6 — зависимости коэффициента избытка воздуха в уходящих газах $\alpha_{уг}$

его нагрузки, что приводит к увеличению присосов воздуха.

На основании проведенного анализа работающих на мазуте котлоагрегатов ДКВр-10-13 в отопительно-производственной котельной, расположенной в Санкт-Петербурге, можно сделать вывод, что методики расчета двух последних редакций отличаются друг от друга и дают расхождение в балансовых величинах не более 5–10 %.

Однако в сравнении с результатами режимно-наладочных испытаний использование методики расчета последней редакции дает результаты, более точно согласующиеся с экспериментальными зависимостями, и в сравнении с методикой, описанной во второй редакции, снижает расхождение с экспериментальными данными на 5–10 %.

Рис. 6. Зависимости расчетных величин и экспериментальных значений, принятых по данным карты режимно-наладочных испытаний котлоагрегата $q_r, \%$ от $\eta_{ка}, \%$: 1, 2, 3 — зависимости потерь теплоты с уходящими газами q_2 ; 4, 5, 6 — зависимости потерь теплоты с химической неполнотой сгорания топлива q_3 ; 7, 8 — зависимости потерь теплоты через наружные ограждения котлоагрегата q_5

Библиографический список

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод); под редакцией Н. В. Кузнецова [и др.]. 2-е изд. перераб. М.: Энергия, 1973. 296 с.
2. Тепловой расчет котлов (нормативный метод): 3-е изд. перераб и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
3. Павлюкова В. В., Картавская В. М. Выбор и тепловой расчет теплоутилизатора уходящих газов котлов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием: в 2 томах; под общ. ред. В. В. Федчишина. Иркутск: ИрГТУ, 2018. С. 276–281.
4. Фурсов И. Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: 4-е изд. перераб. и доп. Барнаул: АлтГТУ, 2017. 297 с.
5. Кудинов А. А., Зиганишина С. К. Исследование режимов работы паровых котлов ООО «САМАРАОРГ-СИНТЕЗ» // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Естественные науки и техносферная безопасность: сб. статей под ред. М. И. Бальзанникова [и др.]. Самара: СамГАСУ, 2016. С. 155–159.
6. Кудинов А. А., Зиганишина С. К. Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения. М.: ИНФРА-М, 2016. 320 с.
7. Зиганишина С. К., Кудинов А. А. Повышение экономичности котельных установок ТЭС и систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 62–66.
8. Ионкин И. Л., Супранов В. М., Егорова Л. Е., Плешанов К. А. Паровые котлы, основы поверочного расчета. М.: ТУРСУ-ПРЕСС, 2015. 68 с.
9. Тайлашева Т. С. Анализ опыта эксплуатации котлов типа ДКВр // Вестник науки Сибири. 2014. № 3 (13). С. 11–15.
10. Игнатьев В. С. Методические основы создания котлов малой теплопроизводительности на местных видах топлива // Материалы VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата; под ред. М. П. Лебедева. Якутск: Медиа-холдинг Якутия, 2013. С. 112–121.
11. Рундыгин Ю. А., Гильде Е. Э., Судakov А. В. Машиностроение. Энциклопедия. Расчет и конструирование машин: котельные установки. М.: Машиностроение, 2009. 400 с.
12. Шигапов А. Б., Шашкин А. В., Усков Д. А. Параметрическое исследование радиационного теплообмена в топках энергетических котлов методом характеристик // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 5-6. С. 11–19.
13. Ушаков С. Г., Муромкин Ю. Н., Шелыгин Б. Л. Тепловой поверочно-конструкторский расчет котлов с естественной циркуляцией. Иваново: ИГЭУ, 2004. 116 с.
14. Беднаржевский В. С., Добротина Г. Б. Алгоритмизация режимов теплового расчета котлоагрегатов // Известия Алтайского государственного университета. 2004. № 1 (31). С. 63–65.

15. Беднаржевский В. С., Оскорбин Н. М. Основные положения теплового расчета паровых котлов на ЭВМ // Теплоэнергетика. 2002. № 8. С. 48–50.

References

1. *Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov (normativnyy metod)* [Heat calculation of boiler units (normative method)]. Ed. by Kuznetsov N. V., et al. 2-nd ed., revised. Moscow, Energiya Publ., 1973, 296 p.
2. *Teplovoy raschet kotlov (normativnyy metod)* [Thermal calculation of boilers (normative method)]. 3-rd ed., revised. St. Petersburg, NPO TsKTI Publ., 1998, 256 p.
3. Pavlyukova V. V., Kartavskaya V. M. *Vybor i teplovoy raschet teplouutilizatora ukhodyashchikh gazov kotlov* [Selection and heat calculation of the waste gas heat exchanger of boilers]. *Trudy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Improving the efficiency of energy production and use in Siberia"]. In 2 vols. Ed. by Fedchishin V. V. Irkutsk, IrGTU Publ., 2018, pp. 276–281.
4. Fursov I. D. *Konstruirovaniye i teplovoy raschet parovykh kotlov* [Design and heat calculation of steam boilers]. 4-th ed., revised. Barnaul, AltGTU Publ., 2017, 297 p.
5. Kudinov A. A., Ziganshina S. K. *Issledovaniye rezhimov raboty parovykh kotlov OOO «SAMARAORGSINTEZ»* [Research of operating modes of steam boilers of LLC "SAMARAORGSINTEZ"]. *Sb. statey "Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Estestvennye nauki i tekhnosfernaya bezopasnost'"* [Collection of articles "Traditions and innovations in construction and architecture. Natural sciences and technosphere safety"]. Ed. by Bal'zannikov M. I., et al. Samara, SamGASU Publ., 2016, pp. 155–159.
6. Kudinov A. A., Ziganshina S. K. *Energoberezheniye v kotel'nykh ustanovkakh TES i sistem teplosnabzheniya* [Energy saving in boiler installations of thermal power plants and heat supply systems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016, 320 p.
7. Ziganshina S. K., Kudinov A. A. *Povysheniye ekonomichnosti kotel'nykh ustanovok TES i sistem teplosnabzheniya* [Improving the efficiency of boiler plants of thermal power plants and heat supply systems]. *Teploenergetika – Heat and Power Engineering*, 2016, no. 8, pp. 62–66.
8. Ionkin I. L., Supranov V. M., Egorova L. E., Pleshanov K. A. *Parovye kotly, osnovy poverochnogo rascheta* [Steam boilers, fundamentals of verification calculation]. Moscow, TURUS-PRESS Publ., 2015, 68 p.
9. Taylasheva T. S. *Analiz opyta ekspluatatsii kotlov tipa DKVr* [Analysis of operating experience with boilers of the DKVR type]. *Vestnik nauki Sibiri – Bulletin of Science of Siberia*, 2014, no. 3 (13), pp. 11–15.
10. Ignat'ev V. S. *Metodicheskie osnovy sozdaniya kotlov maloy teploproizvoditel'nosti na mestnykh vidakh topliva* [Methodical bases of creation of boilers of small heat capacity on local types of fuel]. *Trudy VI Evraziyskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata* [Proceedings of the VI Eurasian Symposium on the problems of strength of materials and machines for cold climate regions]. Ed. by Lebedev M. P. Yakutsk, Media-kholding Yakutiya Publ., 2013, pp. 112–121.
11. Rundygin Yu. A., Gil'de E. E., Sudakov A. V. *Mashinostroeniye. Entsiklopediya. Raschet i konstruirovaniye mashin: kotel'nye ustanovki* [Mechanical Engineering. Encyclopedia. Calculation and design of machines: boiler plants]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 2009, 400 p.
12. Shigapov A. B., Shashkin A. V., Uskov D. A. *Parametricheskoye issledovaniye radiatsionnogo teploobmena v topkakh energeticheskikh kotlov metodom kharakteristik* [Parametric study of radiation heat transfer in the furnaces of power boilers by the method of characteristics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki – Bulletin of higher educational institutions. Energy Problems*–2006, 2006, no. 5–6, pp. 11–19.
13. Ushakov S. G., Muromkin Yu. N., Shelygin B. L. *Teplovoy poverochno-konstruktorskiy raschet kotlov s estestvennoy tsirkulyatsiey* [Thermal verification and design calculation of boilers with natural circulation]. Ivanovo, IGEU Publ., 2004, 116 p.
14. Bednarzhevskiy V. S., Dobrotina G. B. *Algoritmizatsiya rezhimov teplovogo rascheta kotloagregatov* [Algorithmic modes of thermal calculation of boiler units]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Altai State University*, 2004, no. 1 (31), pp. 63–65.
15. Bednarzhevskiy V. S., Oskorbin N. M. *Osnovnyye polozheniya teplovogo rascheta parovykh kotlov na EVM* [Main provisions of the thermal calculation of steam boilers on a computer]. *Teploenergetika – Heat Power Engineering*, 2002, no. 8, pp. 48–50.