



# Повышение энергетической эффективности обработки подпиточной воды теплосети

Рецензия эксперта на статью получена 25.10.2018 [Expert review of the article received October 25, 2018].

Основным средством противокоррозионной обработки воды для систем теплоснабжения на ТЭЦ и в котельных является удаление коррозионно-агрессивных газов из подпиточной воды теплосети в термических деаэраторах [1, 2].

В последние полвека для противокоррозионной обработки подпиточной воды теплосети широкое применение получили вакуумные деаэраторы [3]. После этих аппаратов коррозионная активность воды не должна превышать определённых технических и экономически приемлемых значений [4].

В работах [3, 5] доказано, что наибольшая энергетическая эффективность теплофикационных турбоустановок ТЭЦ достигается при вакуумной деаэрации подпиточной воды теплосети с минимальной температурой теплоносителей, участвующих в деаэрации. Естественно, при этом должен соблюдаться технологически необходимый температурный режим деаэрации, обеспечивающий соблюдение норм [4].

Повышение энергетической эффективности вакуумной деаэрации может быть осуществлено с помощью совершенствования способов регулирования процесса деаэрации [6] или схем включения вакуумных деаэраторов в теплофикационные турбоустановки [7].

В научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ разработана технология подогрева подпиточной воды на ТЭЦ, обеспечивающая существенное понижение температуры деаэрированной подпиточной воды перед подачей этой воды в теплосеть [8, 9]. Особенность этой технологии заключается в том, что в качестве греющей среды в поверхностном подогревателе исходной воды используют деаэрированную подпиточную воду, которую после подогревателя подают в обратный трубопровод теплосети с температурой 30–45 °С. В большинстве традиционных схем, используемых на отечественных теплоэлектроцентралях, в качестве греющей среды для подогрева исходной воды перед вакуумными деаэраторами используют пар высокопотенциальных производственных отборов турбин.

**Наибольшая энергетическая эффективность теплофикационных турбоустановок ТЭЦ достигается при вакуумной деаэрации подпиточной воды теплосети с минимальной температурой теплоносителей, участвующих в деаэрации**

УДК 621.187.124

## Повышение энергетической эффективности обработки подпиточной воды теплосети

**В. И. Шарапов**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой; **Р. А. – А. Гафуров**, студент магистратуры; **Е. В. Мингараева**, аспирант, кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция», Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ)

Показано, что энергетическая эффективность ТЭЦ существенно зависит от температурного режима подготовки подпиточной воды теплосети. Предложены варианты включения вакуумных деаэрационных установок в тепловые схемы ТЭЦ, обеспечивающие работу теплофикационных турбин с пониженной температурой подпиточной воды. Выполнена оценка энергетической эффективности новых схем. Разработаны решения, позволяющие обеспечить стабильную работу вакуумных деаэраторов при максимальной экономичности работы теплофикационных турбоустановок.

**Ключевые слова:** системы теплоснабжения, подпиточная вода теплосети, ТЭЦ, вакуумные деаэраторы, энергетическая эффективность.

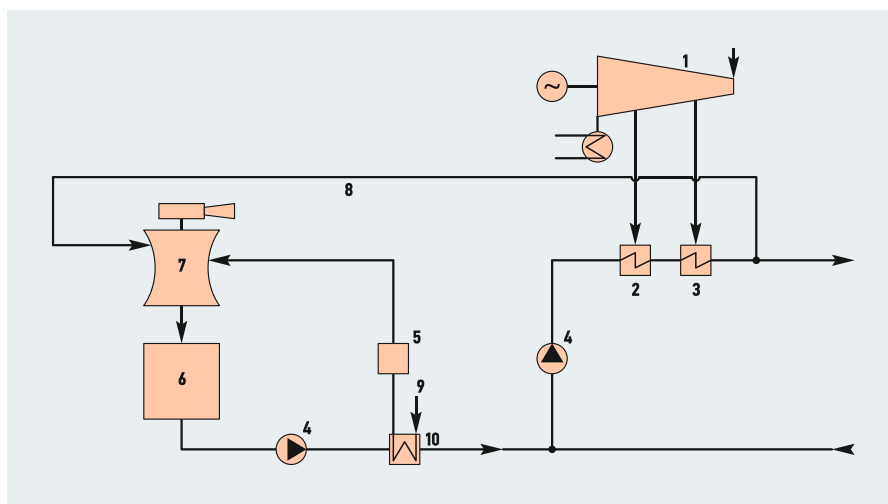
UDC 621.187.124

## Improving the energy efficiency of the preparation of makeup water of the heat network

**V. I. Sharapov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department; **R. A. – A. Gafurov**, graduate student; **E. V. Mingaraeva**, postgraduate student, the Department of the "Heat and Gas Supply and Ventilation", Ulyanovsk State Technical University (UISTU, Ulyanovsk city)

The article shows that the energy efficiency of thermal power plants substantially depends on the temperature mode of preparation of the make-up water of the heat network. The authors have proposed options for the inclusion of vacuum deaeration plants in thermal circuits of thermal power plants, which ensure the operation of heat-generating turbines with a low temperature of make-up water. An assessment of the energy efficiency of new schemes is presented. Developed solutions to ensure the stable operation of vacuum deaerators with maximum efficiency of heating turbines.

**Key words:** heat supply systems, makeup water of the heat network, thermal power plants, vacuum deaerators, energy efficiency.



❖ **Рис. 1.** Схема включения вакуумного деаэратора подпиточной воды теплосети на тепловой электростанции [8, 9] (1 — теплофикационная турбина; 2 — нижний сетевой подогреватель (НСП); 3 — верхний сетевой подогреватель (ВСП); 4 — трубопровод обратной сетевой воды; 5 — водоподготовительная установка; 6 — бак-аккумулятор; 7 — деаэратор; 8 — трубопровод греющего агента; 9 — трубопровод исходной сырой воды; 10 — поверхностный подогреватель исходной воды)

На рис. 1 представлена принципиальная схема тепловой электрической станции, работающей по предложенной технологии. Предложенная технология [8, 9] реализуется следующим образом.

Исходную сырую воду нагревают до технологически необходимой температуры 35–50 °С в поверхностном подогревателе 10 деаэрированной подпиточной водой перед подачей её в сетевой трубопровод 4 перед нижним сетевым подогревателем 2 турбины 1. Затем исходную воду деаэрируют под вакуумом, для чего в вакуумный деаэратор подают в качестве греющего агента перегретую сетевую воду. Деаэрированную подпиточную воду с температурой 50–60 °С отводят из вакуумного деаэратора в бак-аккумулятор, далее её используют в качестве греющей среды в поверхностном подогревателе исходной воды 10, благодаря чему охлаждают до температуры 30–45 °С. За счёт подачи в обратный трубопровод охлаждённой до 30–45 °С деаэрированной

подпиточной воды снижают температуру обратной сетевой воды и увеличивают на турбине 1 выработку электроэнергии на тепловом потреблении [5].

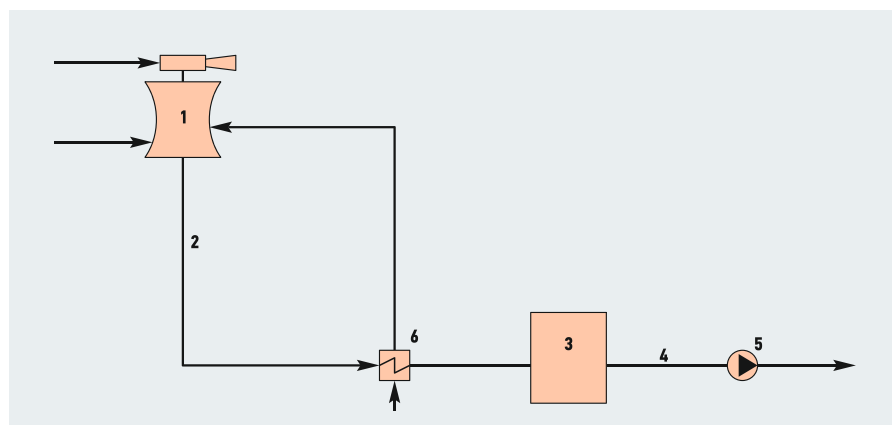
Однако технология [8, 9] не обеспечивает равномерный нагрев исходной воды

перед вакуумным деаэратором. В результате неравномерного расхода подпиточной воды, который в течение суток колеблется от нуля до максимума, невозможен стабильный подогрев исходной воды перед вакуумным деаэратором, что приводит к ухудшению качества деаэрации и, следовательно, к понижению надёжности и экономичности ТЭЦ.

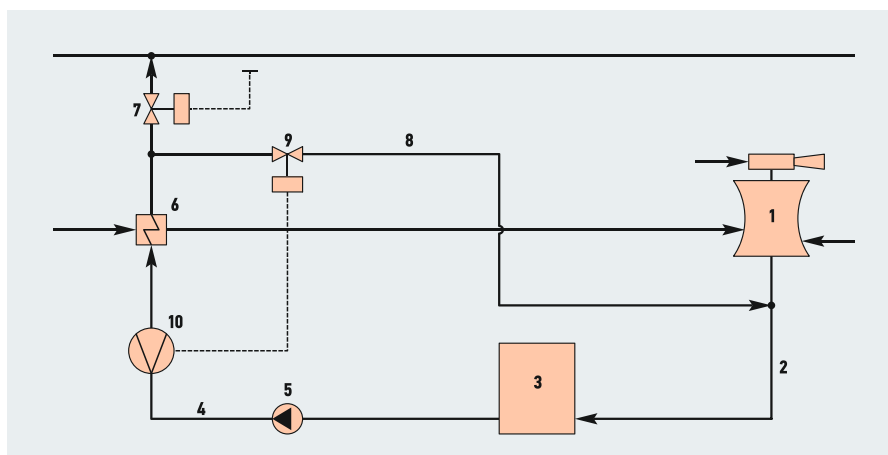
Для стабилизации подогрева исходной воды перед вакуумным деаэратором предложены два новых варианта работы вакуумной деаэрационной установки (рис. 2 и 3). Особенность решения, представленного на рис. 2, заключается в том, что подогреватель исходной воды 6 включён по греющей среде в трубопровод слива 2 деаэрированной воды из вакуумного деаэратора 1 в бак-аккумулятор 3 [10].

Вакуумная деаэрационная установка, изображённая на рис. 3, работает следующим образом [11].

Подпиточная вода теплосети деаэрируется в вакуумном деаэраторе 1, далее по сливному трубопроводу 2 поступает



❖ **Рис. 2.** Схема включения подогревателя исходной воды вакуумного деаэратора подпиточной воды [10] (1 — вакуумный деаэратор; 2 — сливной трубопровод; 3 — бак-аккумулятор; 4 — трубопровод деаэрированной подпиточной воды; 5 — подпиточный насос; 6 — подогреватель исходной воды)



❖ **Рис. 3.** Схема стабилизации подогрева исходной воды перед вакуумным деаэратором [11] (1 — вакуумный деаэратор; 2 — сливной трубопровод; 3 — бак-аккумулятор; 4 — трубопровод подпиточной деаэрированной воды; 5 — подпиточный насос; 6 — подогреватель исходной воды; 7 — регулятор подпитки теплосети; 8 — трубопровод-перемычка; 9 — регулирующий орган регулятора расхода; 10 — датчик расхода)

в бак-аккумулятор 3, затем в трубопровод 4 подпиточной деаэрированной воды тепловой сети с включённым в него подпиточным насосом 5, подогревателем 6 исходной воды, регулятором 7 подпитки теплосети. Трубопровод 4 деаэрированной подпиточной воды между подогревателем 6 исходной воды и регулятором 7 подпитки теплосети соединён со сливным трубопроводом 2 между вакуумным деаэратором 1 и бак-аккумулятором 3 трубопроводом-перемычкой 8, в который включён регулирующий орган 9 регулятора расхода, работа которого зависит от показаний датчика расхода 10, установленного на трубопроводе 4 деаэрированной подпиточной воды между насосом 5 подпитки тепловой сети и подогревателем 6 исходной воды.

При малом расходе сигнал идёт от датчика расхода 10 деаэрированной подпиточной воды на регулирующий орган 9 регулятора расхода, который, в свою очередь, открывается, и подпиточная деаэрированная вода через трубопровод-перемычку 8 поступает в сливной трубопровод 2 между вакуумным деаэратором 1 и баком-аккумулятором 3. Тем самым поддерживается стабильный расход подпиточной деаэрированной воды через подогреватель 6 и стабильный нагрев исходной воды в этом подогревателе.

Рассмотрим алгоритм расчёта энергетической эффективности технологий подготовки подпиточной воды теплотрассы методом удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении за счёт отборов пара на подогрев теплоносителей в тепловой схеме водоподготовки [5]. Экономичность новых технологий оценивается по величине годовой экономии условного топлива при переходе от традиционной схемы подогрева исходной воды перед деаэратором паром производственного отбора турбин к новым рассмотренным схемам нагрева исходной воды. Расчёт выработки электроэнергии на тепловом потреблении для новых схем будет идентичен, так как в обоих случаях подразумевается стабильный нагрев исходной воды при пониженной температуре подпиточной воды.



Мощность  $N_{\text{тф}}^{\text{всп}}$  [кВт], развиваемая турбиной на тепловом потреблении за счёт нижнего теплофикационного отбора пара на подогрев потоков сетевой воды в нижнем сетевом подогревателе, запишется как:

$$N_{\text{тф}}^{\text{всп}} = \frac{G_{\text{с.в}} c (h_0 - h_{\text{нсп}}) (\tau_1 - \tau_2)}{h_{\text{нсп}} - h_{\text{к.нсп}}} \eta_{\text{э}} \eta_{\text{м}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{с.в}}$  — расход сетевой воды через сетевые подогреватели, т/ч;  $\tau_1$  — расчётная температура сетевой воды, подаваемой потребителю после подогрева в сетевых подогревателях, °C;  $\tau_2$  — температура обратной сетевой воды после смешения с деаэрированной подпиточной водой, °C;  $c$  — удельная теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C);  $h_0$  — энтальпия острого пара, кДж/кг;  $h_{\text{нсп}}$  — энтальпия пара нижнего отбора, кДж/кг;  $h_{\text{к.нсп}}$  — энтальпия конденсата нижнего сетевого подогревателя, кДж/кг;  $\eta_{\text{э}}$  и  $\eta_{\text{м}}$  — электрический и механический КПД турбогенератора.

Мощность, вырабатываемая паром отборов, расходуемым на регенеративный подогрев конденсата пара, используемого для подогрева потоков сетевой воды в нижнем сетевом подогревателе, будет иметь вид:

$$N_{\text{рег}}^{\text{всп}} = \frac{G_{\text{с.в}} c (\tau_1 - \tau_2) (h_{\text{п.в}} - h_{\text{к.нсп}}) (h_0 - h_{\text{рег}}^{\text{всп}})}{(h_{\text{нсп}} - h_{\text{к.нсп}}) (h_{\text{рег}}^{\text{всп}} - h_{\text{п.в}})} \eta_{\text{э}} \eta_{\text{м}}, \quad (2)$$

где  $h_{\text{рег}}^{\text{всп}} = 0,5(h_0 + h_{\text{нсп}})$  — энтальпия условного эквивалентного регенеративного отбора, кДж/кг.



Мощность  $N_{\text{тф}}^{\text{всп}}$  [кВт], развиваемая турбиной на тепловом потреблении за счёт верхнего теплофикационного отбора пара на подогрев потоков сетевой воды в верхнем сетевом подогревателе, имеет соответствующий вид:

$$N_{\text{тф}}^{\text{всп}} = \frac{G_{\text{с.в}} c (h_0 - h_{\text{всп}}) (\tau_1 - \tau_2)}{h_{\text{всп}} - h_{\text{к.всп}}} \eta_{\text{э}} \eta_{\text{м}}, \quad (3)$$

где  $h_{\text{всп}}$  — энтальпия пара верхнего отбора, кДж/кг;  $h_{\text{к.всп}}$  — энтальпия конденсата верхнего сетевого подогревателя, кДж/кг.

Мощность, вырабатываемая паром отборов, расходуемым на регенеративный подогрев конденсата пара, используемого для подогрева потоков сетевой воды в верхнем сетевом подогревателе, запишется как:

$$N_{\text{рег}}^{\text{всп}} = \frac{G_{\text{с.в}} c (\tau_1 - \tau_2) (h_{\text{п.в}} - h_{\text{к.всп}}) (h_0 - h_{\text{рег}}^{\text{всп}})}{(h_{\text{всп}} - h_{\text{к.всп}}) (h_{\text{рег}}^{\text{всп}} - h_{\text{п.в}})} \eta_{\text{э}} \eta_{\text{м}}, \quad (4)$$

где  $h_{\text{рег}}^{\text{всп}} = 0,5(h_0 + h_{\text{всп}})$  — энтальпия условного эквивалентного регенеративного отбора, кДж/кг.

Увеличение расхода топлива на дополнительную выработку пара в котле при увеличении расхода пара на нижний и верхний сетевые подогреватели и снижении энтальпии этого пара:

$$\Delta B_{\text{доп}} = \frac{\Delta D (h_0 - h_{\text{п.в}})}{Q_{\text{у.т}} \eta_{\text{к}}}, \quad (5)$$

где  $\Delta D$  — увеличение расхода пара при изменении температуры сетевой воды, т/ч;  $Q_{\text{у.т}}$  — теплота сгорания условного топлива, кДж/кг;  $\eta_{\text{к}}$  — КПД котла.

**Экономичность новых технологий оценивается по величине годовой экономии условного топлива при переходе от традиционной схемы подогрева исходной воды перед деаэратором паром производственного отбора турбин к новым схемам нагрева исходной воды**



Годовая экономия условного топлива на ТЭЦ при использовании новых технологий составляет:

$$\Delta B = \left[ (\Delta N_{\text{тф}} + \Delta N_{\text{рег}}) (b_3^k - b_3^r) 10^{-3} - \Delta B_{\text{доп}} \right] n_{\text{час}}, \quad (6)$$

где  $b_3^k$  — удельный расход условного топлива на конденсационную выработку электроэнергии;  $b_3^r$  — удельный расход условного топлива на теплофикационную выработку электроэнергии;  $n_{\text{час}}$  — число часов работы турбины.

Расчёт выполнялся для следующих исходных данных: котёл паропроизводительностью 500 т/ч, теплофикационная турбина Т-100-130; расход сетевой воды через сетевые подогреватели турбины принят  $G_{\text{с.в}} = 3600$  т/ч; расход подпиточной воды —  $G_{\text{подп}} = 800$  т/ч; температура подпиточной воды в традиционном режиме принята  $t_{\text{подп}} = 60^\circ\text{C}$ ; в новых режимах —  $t_{\text{нов}}^{\text{подп}} = 40^\circ\text{C}$ ; температура сетевой воды, подаваемой потребителю после подогрева в сетевых подогревателях, —  $t_1 = 90^\circ\text{C}$ ; температура обратной сетевой воды в обычном режиме  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ ; в новом после смешения с холодной деаэрированной подпиточной водой —  $t_2^{\text{нов}} = 55^\circ\text{C}$ .

Результат расчёта показал, что при применении новых технологий достигается годовая экономия условного топлива 7334,8 т. При стоимости условного топлива в Ульяновске 3700 руб. за тонну эта годовая экономия составляет в денежном выражении 27 138 760 руб.

## Выводы

1. Энергетическая эффективность ТЭЦ существенно зависит от температурного режима подготовки подпиточной воды теплосети.
2. Разработаны варианты включения вакуумных деаэрационных установок в тепловые схемы ТЭЦ, обеспечивающие работу теплофикационных турбин с пониженной температурой подпиточной воды.
3. Предложены решения, обеспечивающие стабильную работу вакуумных деаэраторов при максимальной экономичности работы теплофикационных турбоустановок.
4. Выполнена оценка энергетической эффективности новых схем. ●

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
2. Олиker И.И., Пермьяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. — Л.: Энергия, 1971. 185 с.
3. Шарапов В.И. Актуальные проблемы использования вакуумных деаэраторов в открытых системах теплоснабжения // Теплоэнергетика, 1994. №8. С. 53–57.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Утв. приказом Минэнерго РФ от 19.06.2003 №229.
5. Шарапов В.И. Методика оценки энергетической эффективности структурных изменений в тепловых схемах ТЭС // Труды Академэнерго, 2015. №2. С. 27–37.
6. Патент РФ №2147559. МПК F22D1/50, F22D5/26. Вакуумная деаэрационная установка / В.И. Шарапов, Д.В. Цюра. Заявл. 02.08.2002; опубл. 27.04.2004. Б.И. 2004. №11.
7. Патент РФ №2174182. МПК F01K17/02. Способ работы тепловой электрической станции / В.И. Шарапов, Е.В. Макарова. Заявл. 09.06.2000; опубл. 27.09.2001. Б.И. 2001. №27.
8. Патент РФ №2469955. МПК C02F1/20, F01K17/02. Способ вакуумной деаэрации подпиточной воды теплосети на тепловой электростанции / В.И. Шарапов, С.Е. Фирсова, В.В. Птичкина. Заявл. 25.11.2011; опубл. 20.12.2012. Б.И. 2012. №35.
9. Патент РФ №2469956. МПК C02F1/20, F01K17/02. Способ вакуумной деаэрации подпиточной воды теплосети на тепловой электростанции / В.И. Шарапов, С.Е. Фирсова, В.В. Птичкина. Заявл. 25.11.2011; опубл. 20.12.2012. Б.И. 2012. №35.
10. Патент РФ №177330. МПК F22D1/50, F22D5/26. Вакуумная деаэрационная установка / В.И. Шарапов, Р.А. Гафуров. Заявл. 14.11.2017; опубл. 15.02.2018. Б.И. 2018. №5.
11. Патент РФ №178279. МПК F22D1/50, F22D5/26. Вакуумная деаэрационная установка / В.И. Шарапов, Р.А. Гафуров. Заявл. 07.12.2017; опубл. 28.03.2018. Б.И. 2018. №10.

## Improving the energy efficiency of the preparation of makeup water of the heat network. Pp. 50–53.

**V.I. Sharapov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department; **R.A.-A. Gafurov**, graduate student; **E.V. Mingaraeva**, postgraduate student, the Department of the "Heat and Gas Supply and Ventilation", Ulyanovsk State Technical University (ULSTU, Ulyanovsk city)

1. Sokolov E.Ja. *Teplofikacija i teplovye seti* [Heat and heat networks]. Moscow. *Izd-vo MJeI* [Publishers of Moscow State National Research University of Civil Engineering]. 2001. 472 p.
2. Olikier I.I., Permjakov V.A. *Termicheskaja deajeracija vody na teplovyh jelektrostantsijah* [Thermal deaeration of water in thermal power plants]. Leningrad. *Jenergija* ["Energy" Magazine]. 1971. 185 p.
3. Sharapov V.I. *Aktual'nye problemy ispol'zovaniya vakuumnyh deajeratorov v otkrytyh sistemah teplosnabzhenija* [Actual problems of using vacuum deaerators in open heating systems]. *Teplojenergetika* ["Thermal Engineering" Magazine]. 1994. No. 8. Pp. 53–57.
4. *Pravila tehnikeskoj jekspluatatsii jelektricheskikh stancij i setej* [Rules of technical operation of power plants and networks]. *Utv. prikazom Minjenergo RF ot 19.06.2003 No. 229* [Approved by the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 229 of June 19, 2003].
5. Sharapov V.I. *Metodika ocenki jenergeticheskoy jeffektivnosti strukturnykh izmenenij v teplovyh shemah TJeS* [Methodology for assessing the energy efficiency of structural changes in thermal schemes of thermal power plants]. *Trudy Akademjenergo* ["Transactions of Academenergo" Magazine]. 2015. No. 2. Pp. 27–37.
6. The patent of the Russia No. 2147559. IPC F22D1/50, F22D5/26. *Vakuumnaja deajeracionnaja ustanovka* [Vacuum deaeration plant]. Sharapov V.I., Cjura D.V. Decl. of August 02, 2002. Publ. of April 27, 2004. Bul. No. 11. 2004.
7. The patent of the Russia No. 2174182. IPC F01K17/02. *Sposob raboty teplovoj jelektricheskoy stancii* [The method of operation of a thermal power station]. Sharapov V.I., Makarova E.V. Decl. of June 09, 2000. Publ. of September 27, 2001. Bul. No. 27. 2001.
8. The patent of the Russia No. 2469955. IPC C02F1/20, F01K17/02. *Sposob vakuumnoj deajeracii podpitochnoj vody teploseti na teplovoj jelektrostantsii* [Method of vacuum deaeration of make-up water of a heat network at a thermal power plant]. Sharapov V.I., Firsova S.E., Ptichkina V.V. Decl. of November 25, 2011. Publ. of December 20, 2012. Bul. No. 35. 2012.
9. The patent of the Russia No. 2469956. IPC C02F1/20, F01K17/02. *Sposob vakuumnoj deajeracii podpitochnoj vody teploseti na teplovoj jelektrostantsii* [Method of vacuum deaeration of make-up water of a heat network at a thermal power plant]. Sharapov V.I., Firsova S.E., Ptichkina V.V. Decl. of November 25, 2011. Publ. of December 20, 2012. Bul. No. 35. 2012.
10. The patent of the Russia No. 177330. IPC F22D1/50, F22D5/26. *Vakuumnaja deajeracionnaja ustanovka* [Vacuum deaeration plant]. Sharapov V.I., Gafurov R.A. Decl. of November 14, 2017. Publ. of February 15, 2018. Bul. No. 5. 2018.
11. The patent of the Russia No. 178279. IPC F22D1/50, F22D5/26. *Vakuumnaja deajeracionnaja ustanovka* [Vacuum deaeration plant]. Sharapov V.I., Gafurov R.A. Decl. of December 07, 2017. Publ. of March 28, 2018. Bul. No. 10. 2018.