

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ / NUCLEAR POWER PLANTS, FUEL CYCLE, RADIATION SAFETY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.120>

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ АЭС

Научная статья

Ширманов И.А.^{1,*}, Щеклеин С.Е.², Глухов С.М.³

²ORCID : 0000-0003-2140-0321;

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

¹ Белоярская АЭС, Заречный, Российская Федерация

³ Уральский Федеральный Университет им. Б. Н. Ельцина, Заречный, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (topzar76123[at]gmail.com)

Аннотация

Проблема обеспечения населения Земли питьевой водой и доступа к ее потреблению признается одной из важнейших Целей тысячелетия в области развития, сформулированных в Декларации тысячелетия ООН в 2000 году. Несмотря на то, что вода составляет около 70% поверхности Земли, вода, пригодная для питья, составляет всего лишь 2,5% от общих запасов. Из-за большой солености морской воды ее невозможно использовать непосредственно для бытовых, сельскохозяйственных и промышленных целей, поэтому ее необходимо очищать и опреснять. В ходе процесса опреснения морской воды необходимо затрачивать значительные энергетические ресурсы, которые влияют на конечную стоимость. Целью данной работы является оценка возможности применения опреснения морской воды при использовании низкопотенциальной теплоты АЭС. Представлен предполагаемый проект организации опреснения морской воды и предполагаемые производительные мощности.

Ключевые слова: АЭС, низкопотенциальная теплота, опреснение морской воды, барабанно-пленочные испарители, дистилляторы бассейнового типа.

ON THE POSSIBILITY OF SEAWATER DESALINATION USING LOW-POTENTIAL HEAT FROM NPPS

Research article

Shirmanov I.A.^{1,*}, Shcheklein S.Y.², Glukhov S.M.³

²ORCID : 0000-0003-2140-0321;

^{1,2} Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

¹ Beloyarsk NPP, Zarechny, Russian Federation

³ Ural Federal University named after B. N. Yeltsin, Zarechny, Russian Federation

* Corresponding author (topzar76123[at]gmail.com)

Abstract

The problem of providing the world's population with drinking water and access to its consumption is acknowledged as one of the most important Millennium Development Goals formulated in the UN Millennium Declaration in 2000. Despite the fact that water makes up about 70% of the Earth's surface, water suitable for drinking is only 2.5 % of the total reserves. Due to the high salinity of seawater, it cannot be used directly for domestic, agricultural and industrial purposes, so it must be treated and desalinated. During the desalination process of seawater, significant energy resources have to be expended, which affect the final cost. The aim of this work is to evaluate the possibility of applying seawater desalination using low potential heat from nuclear power plants. The proposed project of seawater desalination organization and the estimated production capacity are presented.

Keywords: NPPs, low potential heat, seawater desalination, cylindrical film evaporators, basin-type distillers.

Введение

Проблема обеспечения населения Земли питьевой водой и доступа к ее потреблению признается одной из важнейших Целей тысячелетия в области развития, сформулированных в Декларации тысячелетия ООН в 2000 году. Эксперты ООН прогнозируют, что уже к 2030 году спрос на пресную воду возрастет в 3 раза, превышая при этом предложение на 40%.

Несмотря на то, что вода составляет около 70% поверхности Земли, вода, пригодная для питья, составляет всего лишь 2,5% от общих запасов. Согласно отчетам и рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), содержание растворенной соли в питьевой воде, как правило, не должно превышать 500 промилле (1000 промилле в особых случаях) [1]. При этом уровни солености морской воды колеблются от 3500 до 4500 промилле. Из-за большой солености морской воды ее невозможно использовать непосредственно для бытовых, сельскохозяйственных и промышленных целей, поэтому ее необходимо очищать и опреснять.

Среднесуточное производство питьевой воды в результате опреснения во всем мире составляет около $23 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ [2]. Для этого потребляется большое количество энергии, получаемой с использованием ископаемого топлива – ежегодно будет сжигаться около 130 миллионов тонн нефти для производства 13 миллионов кубометров питьевой воды в день [3].

В 2016 году научным центром, сосредоточенным на политике в области возобновляемых источников энергии (REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) было сообщено, что основным источником энергии в мире является ископаемое топливо. На этот вид топлива приходится около 78,35% от общего объема энергии, в то время как на возобновляемые источники энергии – 19,2%, а остальные 2,5% приходится ядерное топливо [4]. В настоящее время человечество активно осваивает и использует альтернативные возобновляемые источники энергии и атомную энергетику.

Методы опреснения воды подразделяются на две группы, первая из которых включает обратный осмос и электролиз. Вторая группа называется термическими процессами, которые включают в себя многократную дистилляцию. Все методы требуют больших энергетических затрат, что обуславливает высокие цены 1 м³ обессоленной воды.

Также для опреснения морской воды применяются возобновляемые источники, в частности энергия Солнца. Однако основным недостатком этого метода является непостоянство солнечного излучения, которое отрицательно влияет на производительность этих систем [5].

В настоящее время существуют крупные опреснительные установки, потребляющие значительные энергетические ресурсы, в связи с чем возникает вопрос поиска надежного, непрерывного и доступного источника тепла. Одним из перспективных источников такой энергии является ядерная энергетика.

В процессе работы АЭС образуется достаточное количество низкопотенциального тепла, которое выбрасывается в геосферу. Известный метод отбора пара из турбины для дистиллирующих установок негативно сказывается на ее технико-экономических показателях. В случае отбора пара из турбины снижается ее мощность, т. к. расход пара на оставшиеся ступени снижается. Преимущество интеграции опреснительного комплекса и АЭС заключается в возможности оптимизации капитальных и эксплуатационных затрат, а также в возможности получения пресной воды для обеспечения собственных нужд АЭС [6].

Целью данной работы является оценка возможности применения опреснения морской воды при использовании низкопотенциальной (сбросной) теплоты АЭС. Для этого была рассчитана тепловая схема АЭС с реактором ВВЭР-1200 и турбоустановкой К-1200-6,8/50 для определения количества низкопотенциального тепла, сбрасываемого в геосферу. Представлен предполагаемый проект организации опреснения морской воды и предполагаемая мощность опреснительной установки [7].

Материалы и методика исследования

В данной работе рассматривается проект установки по опреснению морской воды с помощью использования низкопотенциальной энергии, сбрасываемой АЭС с реактором ВВЭР-1200. Предполагаемая опреснительная установка работает по методу испарительной дистилляции.

Для расчета и моделирования тепловых схем использовался программный комплекс United Cycle. САПР United Cycle предназначена для решения задач по определению оптимальной структуры и состава оборудования теплоэнергетических объектов, а также моделирования и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы энергоустановок.

К особенностям данного программного пакета относятся [8]:

- высокая степень детализации тепловой схемы моделируемого объекта;
- выверенные модели элементов оборудования;
- высокая точность сведения материального и теплового баланса;
- многоуровневая система тестирования на каждом шаге создания модели, расчета и анализа результатов режимов работы.

Исходные данные для расчета цикла турбоустановки К-1200-6,8/50 с учетом регенерации представлены в табл. 1. Рассчитываемая тепловая схема турбоустановки приведена на рис. 1.

Таблица 1 - Исходные данные для расчета

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.120.1>

Номинальные параметры свежего пара	Величины
Давление, МПа (кгс/см ²)	6,79 (69,2)
Температура, °С	283,8
Влажность, %	0,5
Параметры после промежуточного перегрева пара	–
Давление, МПа (кгс/см ²)	0,55 (5,6)
Температура, °С	270,5
Номинальное абсолютное давление пара в конденсаторе, кПа	5,0

Испарительная дистилляция воды бассейного типа является одной из эффективных технологий получения пресной воды. Данные системы характеризуются простой конструкцией, низкими затратами на техническое обслуживание, простотой в эксплуатации и безопасностью. Основным процессом, происходящим в данной установке, является

испарение жидкости с поверхности жидкости при температурах ниже температуры насыщения. Очевидно, что чем выше температура и больше испаряема поверхность жидкости, тем большая производительность будет получена.

Ранее были проведены исследования по вычислению коэффициента аккомодации жидкости при температурах ниже температуры кипения [9]. Получена зависимость массовой скорости испарения дистиллированной воды от температуры рис. 2. Для морской воды с повышенным содержанием соли массовая скорость испарения уменьшается на 5-30%.

В качестве обессоливающей установки была рассмотрена установка для концентрирования жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и других растворов на основе безреагентной технологии [10]. Принцип действия барабанных пленочных испарителей (БПИ) основан на испарении растворителя (воды) с поверхности пленки жидкости, растекающейся по внутренней подогреваемой поверхности вращающегося барабана. Нагрев испарительного барабана на внешней поверхности осуществляется предпочтительно электроподогревом или конденсирующимся паром. Очистка раствора от солевых отложений производится механически, с помощью перекатывающимся спиральным безосевым шнеком.

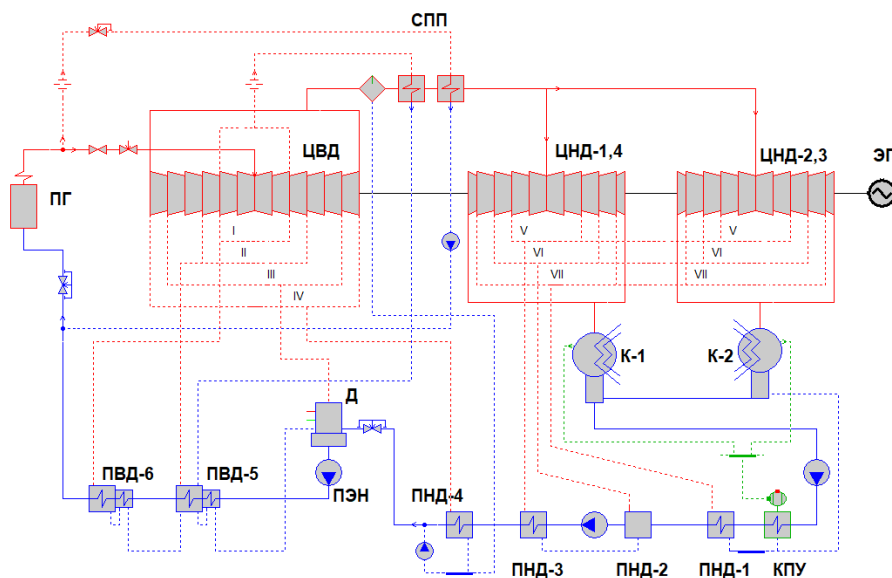


Рисунок 1 - Принципиальная тепловая схема турбоустановки, рассчитанная в United Cycle
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.120.2>

Примечание: I-IV – отсеки ЦВД; V-VIII – отсеки ЦНД; Д – деаэрактор; К-1-2 – конденсатор; КН – конденсатный насос; ПВД-5-6 – подогреватель высокого давления; ПНД-1-4 – подогреватель низкого давления; ПГ – парогенератор; ПЭН – питательный элеткронасос; Э – эжектор; ЭГ–электрогенератор; СПП–сепаратор-пароперегреватель

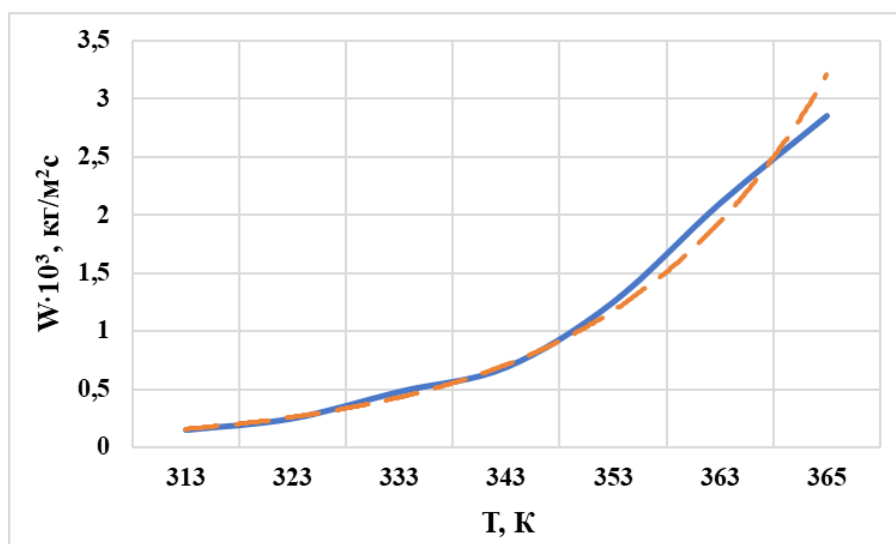


Рисунок 2 - Зависимость массовой скорости испарения дистиллированной воды от температуры
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.120.3>

Рассматриваемый процесс пленочного испарения во вращающемся сосуде либо исключает, либо многократно снижает фрагментацию раствора в результате разрыва пленок паровых пузырьков и уноса мелких капель (аэрозолей) вместе с паром в конденсатор.

В качестве источника соленой воды было выбрано Средиземное море, вблизи которого производится строительство реакторов ВВЭР-1200 (Турция, г. Аккую). Исходные данные для расчета обессоливающей установки по принципу барабанных пленочных испарителей приведена в табл. 2.

Таблица 2 - Исходные данные для расчета обессоливающей установки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.120.4>

Номинальные параметры для расчета	Величины
Расход упариваемой среды (G_H), кг/ч	300
Исходное солесодержание ($X_{нач}$), г/л	38
Конечное солесодержание раствора ($X_{кон}$), г/л	308
Температура исходного раствора ($T_{исх}$), °C	40
Теплоемкость раствора (C_p), Дж/кг*К	3843
Температура кипения раствора ($T_{кип}$), °C	102
Давление в установке ($P_{нас}$), МПа	0,1
Частота вращения барабана (n), об/мин	15-30
Габариты корпуса, L x B x H	4,5 x 1,0 x 1,3

Производительность по испаряемой влаге рассчитывалась по формуле (1):

$$G_{исп} = G_H \cdot \left(1 - \frac{X_{нач}}{X_{кон}}\right) \quad (1)$$

где G_H – расход упариваемой среды, $X_{нач}$ и $X_{кон}$ – исходное и конечное солесодержание раствора. Общая мощность на упаривание с учетом 5% тепловых потерь рассчитывалась по формуле (2):

$$Q_{общ} = 1,05 \cdot (Q_{подогр} + Q_{выпар}) \quad (2)$$

где $Q_{подогр}$ и $Q_{выпар}$ – необходимая мощность на подогрев и испарение раствора.

Результаты и обсуждение

В результате расчета цикла турбоустановки К-1200-6,8/50 с помощью United Cycle были получены следующие результаты:

1. охлаждающая вода, проходя через конденсаторную группу, нагревается до 40 °C при начальных значениях температуры воды 10-15 °C;

2. количество сбрасываемой теплоты в окружающую среду составляет 2187 МВт.

При полученных значениях температуры охлаждающей воды массовая скорость испарения дистиллированной воды составляет 0,2-0,3 г/м²·с. Охлаждающая вода имеет повышенное солесодержание, которое негативно влияет на массовую скорость испарения. Массовая скорость испарения для охлаждающей воды при полученных температурах составит 0,18-0,27 г/м²·с.

Увеличение эффективности испарения при использовании дистилляторов бассейного типа достигается увеличением площади испарительной поверхности и температуры испаряемой жидкости. При увеличении температуры к значениям близким к температурам насыщения при заданном давлении массовая скорость испарения изменится в 10 раз от полученных значений при температуре воды 40 °C.

В ходе расчета обессоливания воды при БПИ достигается большая производительность по испаряемой влаге и компактность установки. При использовании БПИ с заданными начальными условиями производительность по испаряемой влаге составила 262,9 кг/ч. Необходимая мощность на упаривание с учетом тепловых потерь составила 182 кВт. При этом одним из недостатков данной установки является необходимость частичного применения энергии высокого термодинамического качества.

Для сравнения с БПИ так же проведем расчет дистиллятора бассейнового типа с аналогичной производительностью по испаряемой влаге как у БПИ по формуле (3):

$$S = \frac{G_{исп}}{W_1} \quad (3)$$

В ходе сравнения двух установок следует отметить, что для дистилляторов бассейного типа при полученном значении массовой скорости испарения $W_1 = 0,18-0,27$ г/м²·с и аналогичной производительности по испаряемой влаге как у БПИ необходимая площадь бассейна составит $S = 292,2$ м².

Заключение

В ходе проведенной работы был произведен расчет термодинамического цикла АЭС с турбоустановкой К-1200-6,8/50 и реактором ВВЭР-1200 с помощью системы автоматизированного проектирования United Cycle. Определено

количество сбрасываемого низкопотенциального тепла в окружающую среду и определена температура охлаждаемой воды, прошедшей через конденсаторную группу.

Значение сбрасываемой низкопотенциальной теплоты составило 2187 МВт, а температура охлаждаемой воды составила 40 °С. При использовании барабанных аппаратов в качестве обессоливания воды с заданными начальными и конечными параметрами была получена производительность по испаряемой влаге, равная 263 кг/ч. Необходимая мощность, затрачиваемая на подогрев и испарение, составляет 182 кВт. При аналогичной производительности по испаряемой влаге необходимая площадь для дистиллятора бассейного типа составляет $S=292,2 \text{ м}^2$.

Результаты показали эффективность использования как дистилляторов бассейного типа, так и барабанных пленочных испарителей. Дальнейшее усовершенствование цикла обессоливания заключается в оптимизации параметров обессоливающей установки с целью снижения затрат энергии высокого термодинамического качества. Увеличение экономичности и производительности обессоливающей установки достигается с помощью изменения габаритов барабана-испарителя и применения оптимального давления внутри барабана.

Расширение использования атомного источника электрической и тепловой энергии в производстве пресной воды из морской воды является перспективной задачей, поскольку позволит удовлетворить большую часть потребности в пресной воде, как в качестве питьевой воды, так и для орошения сельскохозяйственных земель с использованием сбросной энергии АЭС низкого термодинамического качества.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Tiwari G. N. Present Status of Solar Distillation / G. N. Tiwari, H. N. Singh, R. Tripathi // *Solar Energy*. — 2003. — Vol. 75, №5. — P. 367-373.
2. García-Rodríguez L. Seawater Desalination Driven by Renewable Energies: A Review / L. García-Rodríguez // *Desalination*. — 2002. — Vol. 143, №2. — P. 103–113.
3. Muhammad-Sukki F. Solar Photovoltaic in Malaysia: The Way Forward / F. Muhammad-Sukki, A.B. Munir, R. Ramirez-Iniguez [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2012. — Vol.16, №7. — P. 5232-5244.
4. REN21, Renewables 2016 Global Status Report. — Paris: REN21 Secretariat, 2016. — 272 p.
5. Ильиных В. А. Снижение энергозатрат в установках опреснения воды / В. А. Ильиных, Е. В. Мигалатий // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) — Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2018. — С. 228-231.
6. Велькин В. И. Атомная энергетика и возобновляемые источники энергии – фундамент энергетической безопасности будущего / В. И. Велькин, С. Е. Щеклеин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых (Екатеринбург, 13–16 декабря 2011 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2011. — С. 402-406.
7. Костарев В. С. Об определении оптимальных термодинамических параметров реактора ВВЭР-1200 при помощи компьютерного моделирования / В. С. Костарев, И. А. Ширманов, Д. Н. Литвинов, С. Е. Щеклеин // Физика. Технологии. Инновации: сборник статей VIII Международной молодежной научной конференции (Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2021. — С. 484-492.
8. United Cycle: система автоматизированного проектирования / разработчик ООО «М Системы». — Санкт-Петербург, 2020.
9. Бульба Е. Е. Коэффициент аккомодации жидкости при температурах ниже температуры кипения / Е. Е. Бульба // Теплофизические основы энергетических технологий. Сборник статей V Всероссийской научной конференции с международным участием. — Томск, 2014. — С. 64-68.
10. Пат. 2488421 Российская Федерация, МПК201210871005 В01D 1/22, G21F 9/00. Способ концентрирования жидких растворов / Узиков В.А., Кочнов Я.К., Осипова Н.Е. и др. — № 201210871005; заявл. 2012-03-07; опублик. 2024-05-27. — 12 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tiwari G. N. Present Status of Solar Distillation / G. N. Tiwari, H. N. Singh, R. Tripathi // *Solar Energy*. — 2003. — Vol. 75, №5. — P. 367-373.
2. García-Rodríguez L. Seawater Desalination Driven by Renewable Energies: A Review / L. García-Rodríguez // *Desalination*. — 2002. — Vol. 143, №2. — P. 103–113.
3. Muhammad-Sukki F. Solar Photovoltaic in Malaysia: The Way Forward / F. Muhammad-Sukki, A.B. Munir, R. Ramirez-Iniguez [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2012. — Vol.16, №7. — P. 5232-5244.

4. REN21, Renewables 2016 Global Status Report. — Paris: REN21 Secretariat, 2016. — 272 p.
5. Ilyinykh V. A. Snizhenie jenergozatrata v ustanovkakh opresnenija vody [Reduction of energy consumption in water desalination plants] / V. A. Ilyinykh, E. V. Migalatiy // Jenergo- i resursosberezhenie. Jenergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovljaemye istochniki jenerгии. Atomnaja jenergetika [Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear Power engineering]: materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists dedicated to the memory of Professor N. I. Danilov (1945-2015) – Danilovsky readings (Yekaterinburg, December 10-14, 2018). — Yekaterinburg: UrFU, 2018. — pp. 228-231. [in Russian]
6. Velkin V. I. Atomnaja jenergetika i vozobnovljaemye istochniki jenerгии – fundament jenergeticheskoy bezopasnosti budushhego [Nuclear energy and renewable energy sources — the foundation of energy security of the future] / V. I. Velkin, S. E. Shcheklein // Jenergo- i resursosberezhenie. Jenergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovljaemye istochniki jenerгии [Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources]: a collection of materials of the All-Russian Student Olympiad, scientific and practical conference and exhibition of works by students, postgraduates and young scientists (Yekaterinburg, December 13-16, 2011). — Yekaterinburg: UrFU, 2011. — pp. 402-406. [in Russian]
7. Kostarev V. S. Ob opredelenii optimal'nyh termodinamicheskikh parametrov reaktora VVJeR-1200 pri pomoshhi komp'yuternogo modelirovaniya [On determining the optimal thermodynamic parameters of the VVER-1200 reactor using computer modeling] / V. S. Kostarev, I. A. Shirmanov, D. N. Litvinov, S. E. Shcheklein // Fizika. Tehnologii. Innovacii [Physics. Technologies. Innovations]: collection of articles of the VIII International Youth Scientific Conference (Yekaterinburg, May 17-21, 2021). — Yekaterinburg: UrFU, 2021. — P. 484-492. [in Russian]
8. United Cycle: sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya [United Cycle: computer-aided design system] / developer LLC "M Systems". — St. Petersburg, 2020. [in Russian]
9. Bulba E. E. Koefficient akkomodacii zhidkosti pri temperaturah nizhe temperatury kipenija [Coefficient of accommodation of liquid at temperatures below the boiling point] / E. E. Bulba // Teplofizicheskie osnovy jenergeticheskikh tehnologij [Thermophysical foundations of energy technologies]: Collection of articles of the V All-Russian Scientific Conference with international participation. — Tomsk, 2014. — pp. 64-68. [in Russian]
10. Pat. 2488421 Russian Federation, MPK201210871005 B01D 1/22, G21F 9/00. Sposob kontsentrirvaniya zhidkikh rastvorov [Method of concentration of liquid solutions] / Uzikov V.A., Kochnov Ya.K., Osipova N.E. et al. — № 201210871005; appl. 2012-03-07; publ. 2024-05-27. — 12 p. [in Russian]