

---

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

---

## *ВАКУУМНАЯ, КОМПРЕССОРНАЯ ТЕХНИКА И ПНЕВМОСИСТЕМЫ (05.04.06)*

УДК 66.048.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-124-129

### **Сравнение выпарных установок с механической компрессией пара и установок с применением парогенератора**

А.С. Новиков, А.Б. Малышев

Выпаривание — процесс частичного удаления растворителя из растворов путем удаления последних. Ему подвергают водные растворы твердых веществ, однако растворителями могут служить и другие жидкости. Удаляемый растворитель представляет собой водяной пар, называемый вторичным паром, а пар, расходуемый на нагрев и испарение, называется греющим паром.

В настоящее время выпарные установки широко применяются при очистке и концентрировании промышленных сточных вод с получением обессоленной воды и осадка, что позволяет создать замкнутый водооборот на производственном предприятии, исключить сбросы вредных веществ в водоемы и уменьшить объем сбрасываемых отходов; получении обессоленной воды; опреснении морской воды; упаривании различных технологических растворов до требуемой концентрации (алюминатных растворов, растворов минеральных солей, щелочей, кислот и т. д.); в молочной и пищевой промышленности, медицине.

Как правило, процесс выпаривания осуществляется путем подвода тепла водяного пара, вырабатываемого котельной или тепловой электростанцией. Водяной пар является эффективным теплоносителем, поскольку имеет высокую теплоту конденсации. В некоторых случаях, когда выпаривание проходит при высокой температуре, применяют топочные газы и высокотемпературные нагревающие агенты (дифенильную смесь, перегретую воду, масло).

Если требуется выпаривать жидкости, чувствительные к температурным воздействиям, используют специальное оборудование для создания глубокого вакуума (пароструйные и водоструйные вакуумные насосы, механические вакуумные насосы и пр.). Это позволяет проводить процесс выпаривания при 60 (молочная промышленность) и даже 35 °С (медицина).

Зачастую производственные площадки не обладают источником водяного пара, а строительство новых котельных экономически невыгодно или неосуществимо по тем или иным причинам, тогда при разработке выпарных установок подбирают альтернативный вариант источника тепла, исходя из условий эксплуатации конкретной установки.

Рассмотрены варианты схем выпарных установок с механической компрессией пара и установок с использованием парогенераторов на различном виде топлива. Изучены возможности применения того или иного варианта в зависимости от свойств перерабатываемых технологических растворов, условий проведения процесса и количества корпусов в установке (одно- и многокорпусное выпаривание). Рассчитана себестоимость одной тонны пара и определен срок окупаемости оборудования.

*Ключевые слова:* выпарная установка, компрессор, парогенератор, удельные затраты.

*Для цитирования:* Новиков А.С., Малышев А.Б. Сравнение выпарных установок с механической компрессией пара и установок с применением парогенератора // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 124—129. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-124-129.

## Comparison of Evaporators with Mechanical Steam Compression and Evaporators Equipped with a Steam Generator

A.S. Novikov, A.B. Malyshev

Evaporation is a process through which solvent is partially removed from solutions by subjecting the latter to evaporation. Aqueous solutions of solid materials are generally subjected to evaporation; however, other liquids may also serve as solvents. The solvent being removed is in this case in vapor form and is called secondary vapor. The vapor used for heating and evaporation is called heating steam.

At present, evaporation plants are widely used in purification and concentration of industrial waste waters to obtain demineralized water and sludge, which makes it possible to set up a closed water cycle at a production enterprise, to exclude discharges of hazardous substances into water bodies, and to decrease the amount of discharged waste; in obtaining demineralized water; in desalination of seawater; in evaporation of various process solutions to the required concentration (aluminate solutions, mineral salt solutions, alkalis, acids and so on); in milk and food industries; and in medicine.

As a rule, evaporation is performed by applying the heat of steam produced at a boiler house or a thermal power plant. Steam is an efficient heat carrier owing to its having high heat of condensation. In some cases, when evaporation has to be carried out at high temperature, furnace gases and high-temperature heating agents (diphenyl mixture, superheated water, or oil) are used.

If it is necessary to evaporate liquids sensitive to temperature effects, special equipment for creating deep vacuum (steam-jet and water-jet vacuum pumps, mechanical vacuum pumps, and others) is used. As a result, evaporation can be carried out at 60 °C (in the milk industry) and even at 35°C (in medicine).

In many cases, production sites do not have a steam source, and construction of new boiler houses is economically unprofitable or unfeasible for some or other reason. In such situations, an alternative heat source is selected subject to the operation conditions of a particular plant.

Process circuit versions of evaporation plants with mechanical steam compression and plants using steam generators operating on different kinds of fuel are considered. The possibilities of using one or another version depending on the properties of treated process solutions, process implementation conditions, and the number of shells in the plant (one- or multi-shell evaporation) are studied. The net cost of one ton of steam is evaluated, and the equipment payback period is estimated.

*Key words:* evaporation plant, compressor, steam generator, specific costs.

*For citation:* Novikov A.S., Malyshev A.B. Comparison of Evaporators with Mechanical Steam Compression and Evaporators Equipped with a Steam Generator. Bulletin of MPEI. 2019;3:124—129. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-124-129.

Выпарные установки с использованием греющего водяного пара от внешнего источника являются классическим вариантом и широко распространены.

В зависимости от объема и свойств перерабатываемого раствора (вязкости, плотности, температуры кипения, склонности к накипеобразованию, пенообразованию и кристаллизации), а также параметров свежего греющего пара используют одно- и многокорпусные выпарные батареи, прямо- и противоток и даже смешанный вид движения сред.

С увеличением числа корпусов в установке уменьшаются удельные затраты греющего пара и оборотной воды (на конденсацию вторичного пара последнего корпуса), но увеличиваются затраты на капиталовложения, электроэнергию, обслуживание и ремонт. Также увеличение корпусов влечет за собой увеличение размеров здания под установку.

Аналитический расчет оптимального числа корпусов приводит к сложным зависимостям, поэтому на практике число корпусов определяют путем технико-экономических расчетов ряда схем выпарных батарей.

На рисунке 1 приведена принципиальная схема двухкорпусной прямоточной выпарной установки с использованием греющего пара от внешнего источника. Подробное описание аппаратурно-технологических схем и принципов их работы приведено в [1 — 4].

В настоящее время в технологии выпаривания применяется механическая компрессия пара [5, 6]. Специалисты ЗАО НПП «Машпром» совместно с разработ-

чиками компрессорного оборудования спроектировали ряд выпарных установок для переработки различных растворов, основными элементами в которых являются выпарные аппараты, оснащенные механическим паровым компрессором. Данный метод отличается относительно низким расходом электроэнергии, а также не требует большого количества охлаждающей воды для конденсации вторичного пара. Компрессия пара происходит при помощи так называемых механических компрессоров. Рабочим органом компрессоров являются мощные центробежные вентиляторы.

Механическая компрессия основана на сжатии вторичного пара, образующегося при кипении раствора в выпарном аппарате, до давления, необходимого для нагрева раствора. Сжатый пар возвращается в теплообменную камеру выпарного аппарата и используется в качестве греющего пара. Таким образом, потенциал вторичного пара сохраняется и используется повторно в замкнутом контуре. Свежий греющий пар нужен только при пуске выпарной установки и выходе на режим. Для этого может быть взят пар от любого источника с требуемыми параметрами.

При работе механических компрессоров возможно появление избыточного тепла. Это приводит к повышению температуры и давления в выпарном аппарате. Снимает такое тепло конденсатор смешения, благодаря ему часть вторичного пара конденсируется за счет контакта с охлаждающей водой.

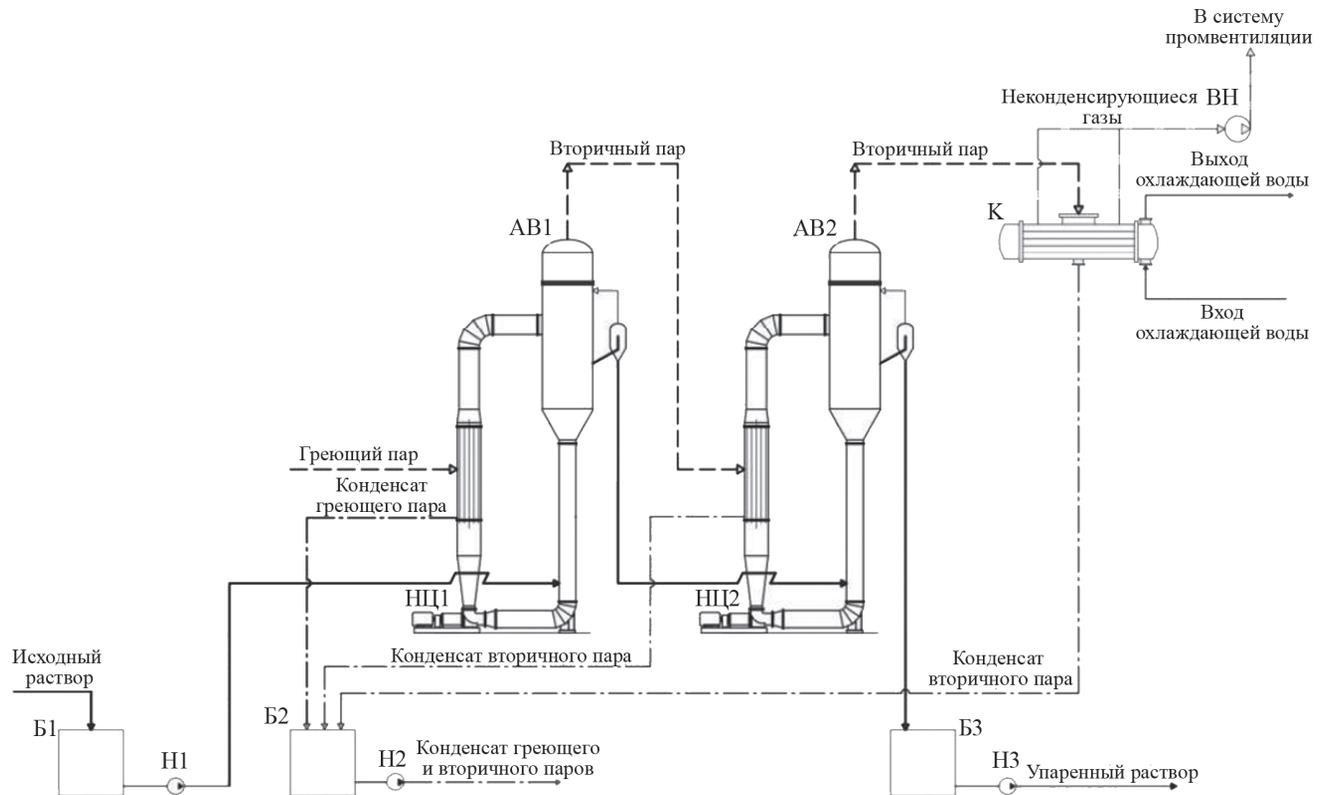


Рис. 1. Принципиальная схема двухкорпусной прямоточной выпарной установки с использованием греющего пара от внешнего источника:

AB1, AB2 — выпарные аппараты с принудительной циркуляцией; НЦ1, НЦ2 — циркуляционные насосы; К — поверхностный конденсатор; Н1, Н2, Н3, Б1, Б2, Б3 — насосы и баки исходного раствора, конденсата и упаренного раствора; ВН — вакуум-насос

В большинстве своем механические компрессоры работают при атмосферном давлении (очистка сточных вод, опреснение) и реже имеют применение при глубоком вакууме (пищевая промышленность, медицина) [7]. Степень сжатия пара одной ступени — 6...9 °С. Дальнейшее увеличение перепада давления ведет к уменьшению КПД компрессора. В связи с этим применение механической компрессии пара для выпаривания высокодепрессивных растворов, депрессия которых достигает 20...80 °С (KOH, NaOH, CaCl<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> и др.), ведет к значительному увеличению числа ступеней сжатия, соответственно, резко возрастают энергозатраты и капиталовложения [8]. По этой причине механическую компрессию пара целесообразно применять для концентрирования растворов, температурная депрессия которых не превышает 6...9 °С (KCl, NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и др.).

Следует отметить, что механическая компрессия возможна только при варианте однокорпусной схемы выпаривания.

На рисунке 2 изображена принципиальная схема однокорпусной выпарной установки с механической компрессии пара.

Выпаривание возможно осуществлять при помощи тепла, вырабатываемого различными парогенераторами. Наиболее широкое распространение в промышлен-

ности получили электрические (электродный нагрев, индукционный, ТЭНовый и др.), газовые и дизельные паровые котлы.

В отличие от механических компрессоров стандартные парогенераторы обладают меньшей паропроизводительностью (от 30 до 10 000 кг/ч), но обеспечивают получение пара с гораздо большим давлением (до 40 кгс/см<sup>2</sup>).

Любой парогенератор в зависимости от рабочего давления имеет требования к подводимой питательной воде, и чем выше давление рабочего пара, тем они строже.

#### Требования к питательной воде газового парогенератора давлением до 10 кгс/см<sup>2</sup>

Общая жесткость, мг-экв/л, не более .....	0,05
Жесткость карбонатная, мг-экв/л, не более .....	0,03
Содержание растворенного кислорода, мг/л, не более.....	0,03
Содержание железа, мг/л, не более .....	0,1

Технология водоподготовки зависит от физико-химического состава воды. Качественная подготовка питательной воды позволяет продлить срок службы оборудования. Как правило, подготовка происходит при помощи фильтрующих материалов или полупроницаемых мембран. В процессе эксплуатации расходуются различные реагенты, и образуются регенерационные растворы, требующие затрат на последующую утилизацию.

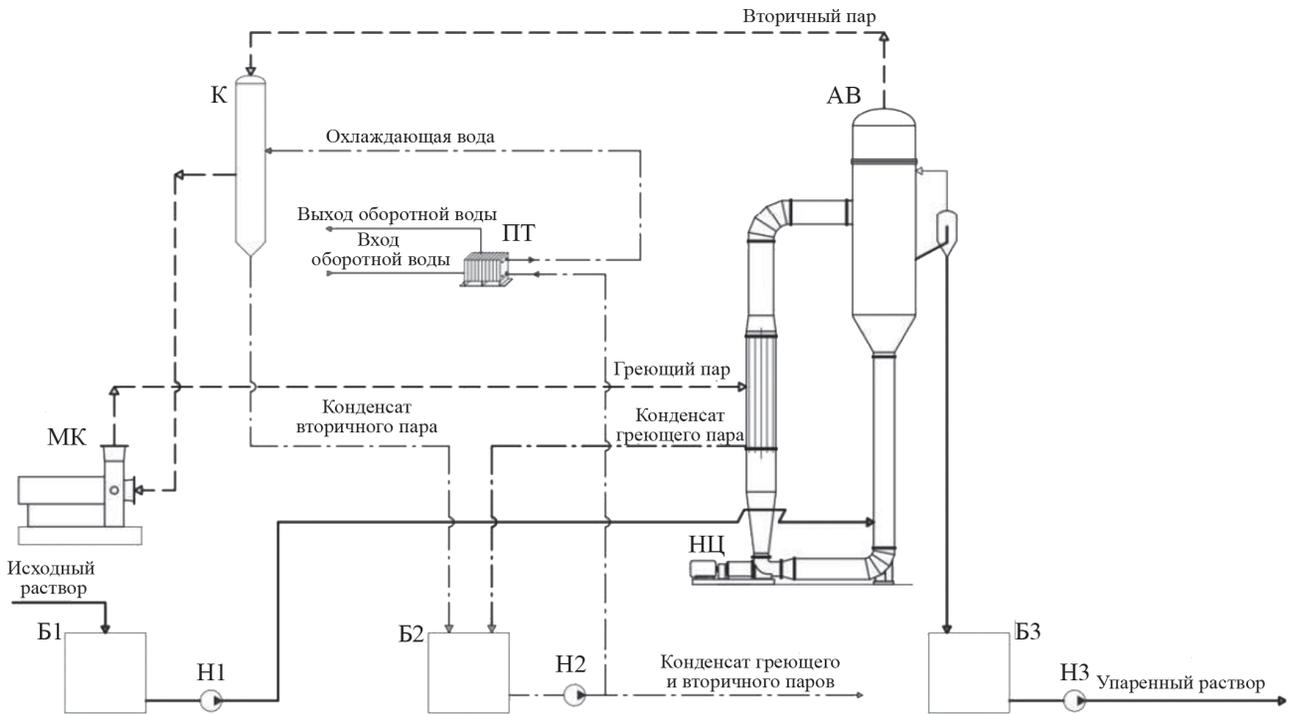


Рис. 2. Схема однокорпусной выпарной установки с механической компрессией пара:

АВ — выпарной аппарат с принудительной циркуляцией; НЦ — циркуляционный насос; МК — механический компрессор; К — конденсатор смешения; Н1, Н2, Н3, Б1, Б2, Б3 — насосы и баки исходного раствора, конденсата и упаренного раствора

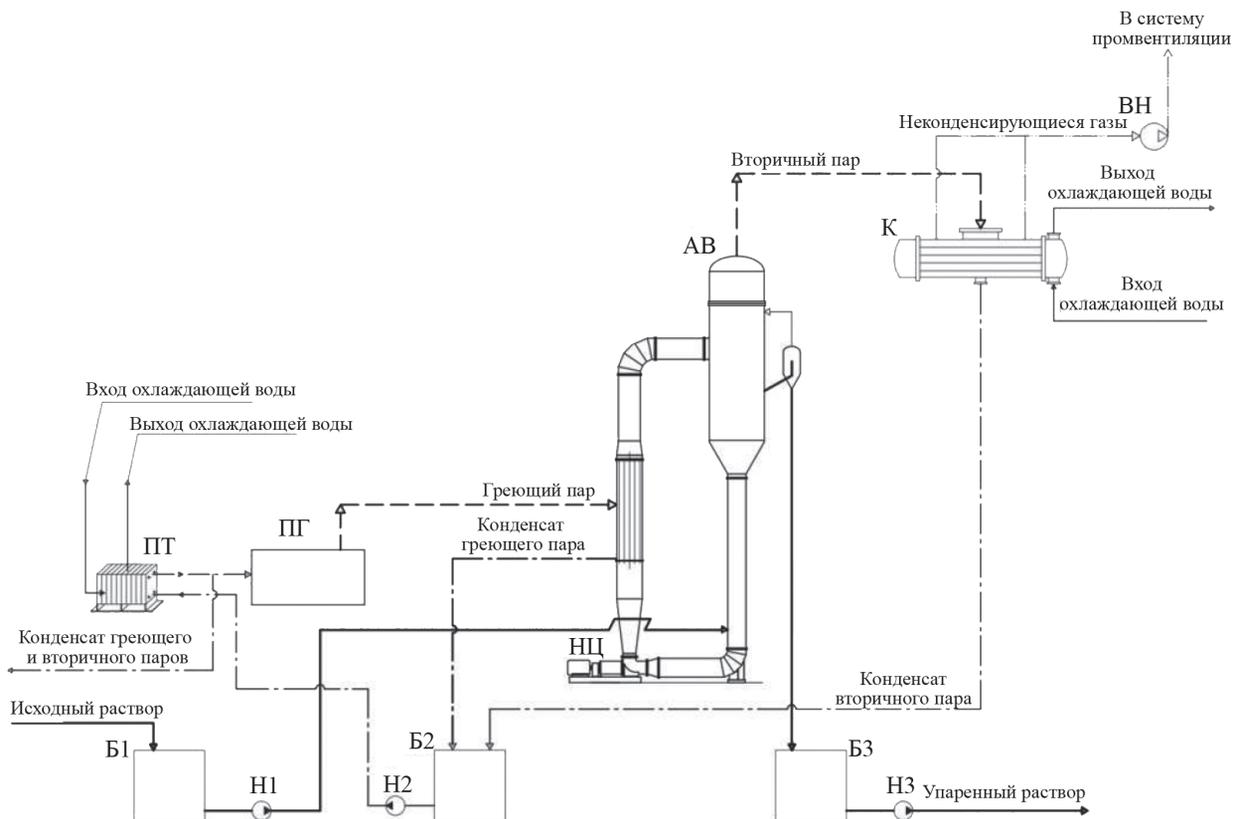


Рис. 3. Принципиальная схема выпарной установки с применением парогенератора:

АВ — выпарной аппарат с принудительной циркуляцией; НЦ — циркуляционный насос; ПГ — парогенератор; К — конденсатор поверхностный; ПТ — пластинчатый теплообменник; Н1, Н2, Н3, Б1, Б2, Б3 — насосы и баки исходного раствора, конденсата и упаренного раствора; ВН — вакуум-насос

### Параметры работы оборудования и удельные затраты энергоносителей на тонну вырабатываемого пара

Показатель	Тип оборудования				
	пар ТЭЦ	механическая компрессия	парогенератор		
			электричество	газ	дизель
Затраты энергоносителя	тонна пара	50 кВт	715 кВт	85 куб. м	70 кг
Средняя стоимость энергоносителя в России	460 руб/т	3,2 руб/кВт	3,2 руб/кВт	4,5 руб/куб. м	37,0 руб/кг
Количество рабочих часов в году	8 200	8 200	8 200	8 200	8 200
Затраты в год, млн руб.	3,8	1,4	18,8	3,2	21,3
Стоимость оборудования, млн руб.	—	8,0	1,0	2,0	2,0
Себестоимость тонны пара, руб.	460,0	160,0	2 288,0	382,5	2 590,0
Срок окупаемости	—	3 года	7 лет	1,5 года	9 лет

В процессе работы парогенераторов на неподготовленной воде на его внутренних поверхностях образуется накипь. При значительной толщине отложений наблюдается перегрев металла, приводящий к снижению производительности, прогоранию стенок и аварийному выходу котла из строя. Поэтому качественная водоподготовка является обязательным условием длительной, эффективной и надежной работы парогенератора.

При работе парогенераторов в составе выпарной установки в качестве питательной воды можно использовать конденсат греющего и вторичного паров. Благодаря определенной конструкции выпарного аппарата и эффективным сепарирующим устройствам достигается высокий коэффициент очистки вторичного пара. Образуется конденсат вторичного пара требуемого качества с низким содержанием примесей. Такая схема применения парогенераторов исключает дополнительную подготовку питательной воды. Соответственно от-

сутствуют затраты на реагенты, фильтрующие материалы и утилизацию регенерационных растворов.

На рисунке 3 приведена принципиальная схема однокорпусной выпарной установки с применением парогенератора, а в таблице даны параметры работы оборудования и удельные затраты энергоносителей на тонну вырабатываемого пара.

Следует отметить, что в таблице указаны параметры работы и удельные затраты парогенераторов в составе выпарной установки, работающей на конденсате греющего и вторичного паров, то есть без затрат на водоподготовку.

Из данных таблицы следует, что механическая компрессия и газовый парогенератор отличаются наиболее низким потреблением энергоносителей и низкой себестоимостью тонны вырабатываемого пара. Срок окупаемости газового парогенератора составляет всего 1,5 года при среднем сроке службы 10 лет. Срок окупаемости механических компрессоров — 3 года, при среднем сроке службы 20 лет.

### Литература

1. Колач Т.А., Радун Д.В. Выпарные станции. М.: Mashgiz, 1963.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971.
3. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981.
4. Борисов Г.С. и др. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. М.: Химия, 1991.
5. **Blowers and compressors** [Электрон. ресурс] <https://www.piller.de/fileadmin/media/pdf-files/brochures/Piller-mechanical-vapor-recompression-blowers.pdf> (дата обращения 01.03.2018).
6. Печенегов Ю.Я., Косов А.В., Жибалов А.Ю. Экономическая эффективность рекуперации теплоты конденсата паровых теплообменников путем сжатия вторичного пара // Промышленная энергетика. 2013. № 1. С. 21—23.

### References

1. Kolach T.A., Radun D.V. Vyparnye Stantsii. M.: Mashgiz, 1963. (in Russian).
2. Kasatkin A.G. Osnovnye Protssesy i Apparaty Khimicheskoy Tekhnologii. M.: Khimiya, 1971. (in Russian).
3. Gel'perin N.I. Osnovnye Protssesy i Apparaty Khimicheskoy Tekhnologii. M.: Khimiya, 1981. (in Russian).
4. Borisov G.S. i dr. Osnovnye Protssesy i Apparaty Khimicheskoy Tekhnologii. Posobie po Proektirovaniyu. M.: Khimiya, 1991. (in Russian).
5. **Blowers and compressors** [Elektron. Resurs] <https://www.piller.de/fileadmin/media/pdf-files/brochures/Piller-mechanical-vapor-recompression-blowers.pdf> (Data Obrashcheniya 01.03.2018).
6. Pechenegov Yu.Ya., Kosov A.V., Zhibalov A.Yu. Ekonomicheskaya Effektivnost' Rekuperatsii Teploty Kondensata Parovykh Teploobmennikov Putem Szhatiya Vtorichnogo Para. Promyshlennaya Energetika. 2013;1:21—23. (in Russian).

7. **Иновационные** технологии в системах производственного водоснабжения. Екатеринбург: Эко-Проект, 2013.

8. **Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л.: Химия, 1987.

7. **Innovatsionnye** Tekhnologii v Sistemakh Proizvodstvennogo Vodosnabzheniya. Ekaterinburg: Eko-Proekt, 2013. (in Russian).

8. **Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A.** Prime-ry i Zadachi Po Kursu Protssesov i Apparatov. L.: Khimiya, 1987. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Новиков Александр Сергеевич** — инженер-проектировщик первой категории ЗАО «НПП «Машпром», г. Екатеринбург, e-mail: k040.ek@mprom.biz

**Мальшев Александр Борисович** — руководитель группы выпарного и кристаллизационного оборудования ЗАО «НПП «Машпром», г. Екатеринбург, e-mail: k044.ek@mprom.biz

#### Information about authors:

**Novikov Aleksandr S.** — Design Engineer of the First Category of JSC «Research & Development Enterprise «Mashprom», Yekaterinburg, e-mail: k040.ek@mprom.biz

**Malyshev Aleksandr B.** — Group Manager for Evaporation and Crystallization Equipment of JSC «Research & Development Enterprise «Mashprom», Yekaterinburg, e-mail: k044.ek@mprom.biz

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 05.04.2018

**The article received to the editor:** 05.04.2018