

## Моделирование процесса подогрева бражки за счет теплоты конденсации паров бражного дистиллята и охлаждения барды

С. Ю. НИКИТИНА<sup>1</sup>, д-р техн. наук А. В. ЖУЧКОВ<sup>2</sup>,

д-р техн. наук С. В. ШАХОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>sunik@mail.ru, <sup>2</sup>79081407661@yandex.ru, <sup>3</sup>s\_shahov@mail.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий  
394036, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, 19

*Рассмотрена целесообразность применения двух различных вариантов подогрева бражки. В первом варианте предложен способ подогрева бражки в стандартных кожухотрубных теплообменниках, исключающий подачу гетерогенной среды в межтрубное пространство, обеспечивающий повышение эффективности теплообмена и удобство в эксплуатации. Другим возможным решением дополнительного подогрева бражки рассмотрено применение кожухотрубного теплообменника с двумя независимыми трубными пучками, состоящими из труб одинакового диаметра для потоков бражки и барды и межтрубным пространством, заполненным жидким теплоносителем. Для обоих процессов приведен алгоритм расчета, который состоит из трех основных блоков: моделирование процесса нагрева бражки в секциях подогревателя; определение температуры промежуточного теплоносителя; расчет температуры исходной смеси. В результате моделирования в программе Mathcad-15, удалось определить и оптимизировать температуры сред в характерных точках схемы. Сравнение двух рассмотренных схем подогрева показало, что общая поверхность теплообмена во втором варианте на 21% выше, чем в первом. При этом, к преимуществам первого варианта подогрева бражки относятся меньшая суммарная поверхность теплообмена и возможность использования стандартного теплообменного оборудования. Недостатком этого способа является необходимость установки циркуляционного насоса. Производственные испытания описанных выше способов подогрева питания бражной колонны были проведены в цехе брагоректификации. Установлено, что применение предложенных способов дополнительного подогрева бражки позволяет получать ректифицированный этанол лучшего качества и с меньшими энергозатратами, по сравнению с типовыми БПУ.*

**Ключевые слова:** моделирование, процесс подогрева бражки, теплота конденсации, пары бражного дистиллята, охлаждение барды.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 10.08.2015, принята к печати 29.01.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-77-81

### Ссылка для цитирования

Никитина С. Ю., Жучков А. В., Шахов С. В. Моделирование процесса подогрева бражки за счет теплоты конденсации паров бражного дистиллята и охлаждения барды // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 77–81.

## Simulation of wort heating process due to the wort distillate vapor condensation heat and stillage cooling

S. YU. NIKITINA<sup>1</sup>, D. Sc. A. V. ZHUCHKOV<sup>2</sup>,

D. Sc. S. V. SHAHOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>sunik@mail.ru, <sup>2</sup>79081407661@yandex.ru, <sup>3</sup>s\_shahov@mail.ru

Voronezh state university of engineering technologies  
19, Revolution avenue Voronezh 394036 Russia

*The feasibility of using two different methods of wort heating is considered in the present study. In the first case, the method of wort heating in the standard tube heat exchangers is provided. It excludes supplying heterogeneous medium in the annulus and provides enhanced heat exchange efficiency and convenient use. Another possible solution of wort additional heating is the use of tube heat exchanger with two separate tube bundles, consisting of the same diameter tubes for the wort and stillage flows and annulus filled with heat transfer fluid. For both processes the calculation algorithm is given. It consists of three main units: modeling of wort heating in the heater sections; determination of the intermediate heat carrier temperature; calculation of the initial mixture temperature. The simulation program Mathcad-15 managed to identify and optimize the temperature of the medium in the characteristic points of the circuit. Comparison of the two heating schemes considered showed that total heat transfer surface in the second case is 21% higher than in the first one. The advantages of the first case of wort heating are smaller total heat exchange surface and the ability to use a standard*

*heat exchange equipment. The disadvantage of this method is the necessity of installing a circulation pump. Production testing of the described above methods of the wort column supply heating was conducted in the wort rectification shop. It was found that the application of the proposed methods of further wort heating produces rectified ethanol of better quality and at lower power consumption compared to standard WRA.*

**Keywords:** modelling, wort heating process, condensation heat, vapours of wort distillate, stillage cooling.

В современных брагоректификационных установках (БРУ) бражка подогревается теплом водно-этанольных паров одной из колонн в кожухотрубных или пластинчатых теплообменниках [1]. Подогреватели бражки обычно устанавливаются над бражной колонной (в аппаратах косвенного действия), ректификационной или эспирационной (в аппаратах прямого и полупрямого действия). Описанным выше способом удается нагреть бражку до температуры 72–82 °С (в аппарате косвенного действия, работающего под атмосферным давлением), что явно недостаточно, поскольку подача холодного питания приводит к конденсации пара на верхних тарелках колонного аппарата, увеличивает нагрузку по жидкой фазе, снижает производительность установки, повышает расход греющего пара. Для обеспечения стабильной работы БРУ целесообразно осуществлять дополнительный подогрев бражки, используя вторичные энергоресурсы спиртового производства, например барду [2–7]. Для подогрева бражки из мелассы теплом барды на ряде спиртовых заводов применяются кожухотрубные теплообменники [1]. Обычно бражка подается в трубное пространство теплообменника, а барда, выводимая из кубовой части бражной колонны, поступает в межтрубное пространство. Однако конструктивные особенности данного типа теплообменников не позволяют использовать их для нагрева зерновой бражки, поскольку межтрубное пространство, по которому перемещается барда, содержащая большое количество твердых включений и взвесей, быстро засоряется, а его очистка крайне затруднена.

В настоящем исследовании предложен способ подогрева бражки в стандартных кожухотрубных теплообменниках, исключаяющий подачу гетерогенной среды в межтрубное пространство, обеспечивающий повышение эффективности теплообмена и удобство в эксплуатации. Принципиальная схема, поясняющая данный способ, показана на рис. 1. Исходная смесь поступает в трубную часть дефлегматора-подогревателя 1, где ее температура увеличивается от  $t_F'$  до  $t_F''$  за счет конденсации водно-этанольного пара, выходящего из верхней части колонны (температура  $t_F''$  зависит от концентрации пара и лимитируется температурой его конденсации). Для дополнительного подогрева бражки теплом барды до температуры  $t_F'''$  используются два кожухотрубных теплообменника 2, 3, межтрубное пространство которых заполнено жидким теплоносителем (вода); в трубном пространстве одного движется барда (бардяная секция) 3, другого — бражка (бражная секция) 2. Жидкий теплоноситель постоянно циркулирует в межтрубных пространствах теплообменников 2 и 3. Для увеличения эффективности теплообмена обвязка подогревателей производится «по принципу протivotока».

Основным достоинством данного устройства является то, что и бражка и барда движутся только по трубам трубных пучков теплообменников, что уменьшает засорение

аппарата, увеличивает интервал между остановками на техническое обслуживание и чистку.

При использовании двухсекционного брагоподогревателя с промежуточным теплоносителем, требуемое значение температуры бражки на входе в бражную колонну  $t_F'''$  может достигаться при различных площадях поверхностей теплообменников 1, 2, 3 ( $F_1, F_2, F_3$ ) (рис. 1), принимая в качестве критерия оптимизации суммарную площадь поверхности теплообмена  $F = F_1 + F_2 + F_3$  можно найти оптимальные размеры каждого подогревателя.

Алгоритм расчета описанного выше процесса состоит из трех основных блоков:

- моделирование процесса нагрева бражки в секциях подогревателя;
- определение температуры промежуточного теплоносителя;
- расчет температуры исходной смеси.

Расчет теплообменников осуществлялся по стандартной методике [8–10]. В результате моделирования в программе Mathcad-15, удалось определить и оптимизировать температуры сред в характерных точках схемы.

В качестве исходных данных задавались: расход  $G_F$ , начальная и конечная температуры бражки  $t_F'$  и  $t_F''$ , температуры в нижней и верхней частях бражной колонны  $t_w'$  и  $t_p$ , необходимые теплофизические характеристики рабочих сред (плотность  $\rho$ , теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C$ , температуропроводность  $a$ , динамическая и кинематическая вязкость  $\mu$  и  $\nu$ ), геометрические размеры теплообменников (длина  $l$  и число труб  $n$ , наружный  $d_n$  и внутренний  $d_b$  диаметры труб, диаметр кожуха  $D$ , количество ходов  $z$ ).

На рис. 2 показаны зависимости суммарной площади поверхности теплообменников  $F$  от поверхности подогревателя 2 для различных значений площади поверхности подогревателя 1.

Расчеты выполнены для следующих условий: расход бражки  $G = 3$  кг/с; массовые доли этанола в бражке  $x_F = 0,1$ , в кубовой жидкости 0,001, в бражном дистилляте 0,665; начальная и конечная температуры бражки  $t_F' = 20$  °С,  $t_F'' = 90$  °С; температуры дистиллята и барды соответственно  $t_p = 82$  °С,  $t_w' = 103$  °С.

Из приведенных данных следует, что минимальному значению суммарной площади соответствуют следующие поверхности теплообмена  $F_1 = 101,8$  м<sup>2</sup>,  $F_2 = 81,0$  м<sup>2</sup>,  $F_3 = 81,2$  м<sup>2</sup>, при этом  $F = 264$  м<sup>2</sup>,  $t_F''' = 79,5$  °С.

Другим возможным решением дополнительного подогрева бражки является применение кожухотрубного теплообменника с двумя независимыми трубными пучками, состоящими из труб одинакового диаметра для потоков бражки и барды и межтрубным пространством, заполненным жидким теплоносителем. На рис. 3 показан принцип действия подогревателя барда — бражка 1 и его общий вид без кожуха и крышек. По верхнему трубному пучку 2 движется бражка, по нижнему трубному пучку 3,

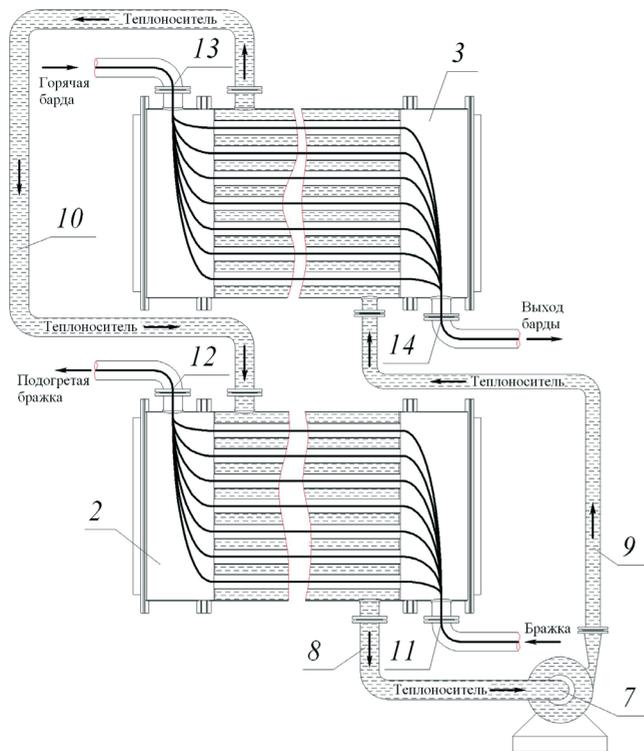
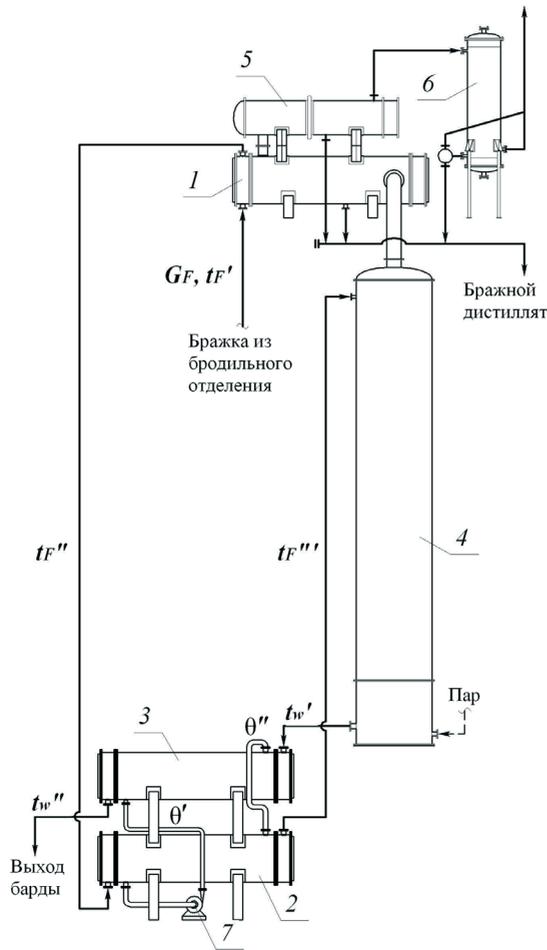


Рис. 1. Схема подогрева бражки с использованием двухсекционного подогревателя с принудительной циркуляцией теплоносителя: 1 — дефлегматор-подогреватель; 2, 3 — подогреватель браджа-бражки; 4 — бражная колонна; 5 — водяная секция подогревателя; 6 — конденсатор; 7 — циркуляционный насос; 8–14 — трубопроводы

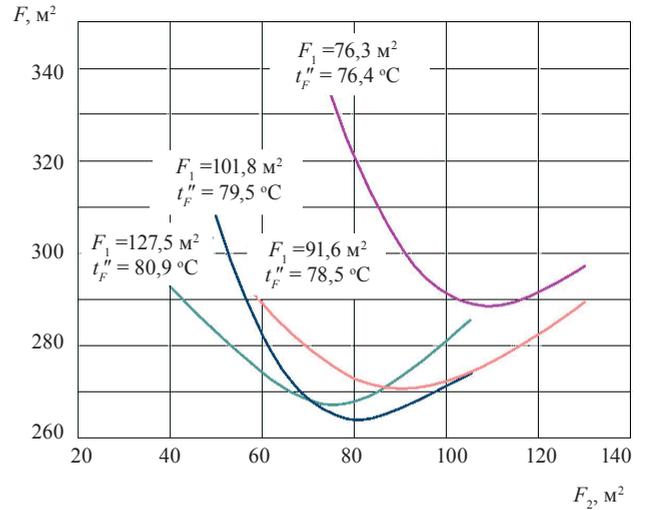


Рис. 2. Зависимость суммарной площади поверхности теплообменников от поверхности подогревателя 2

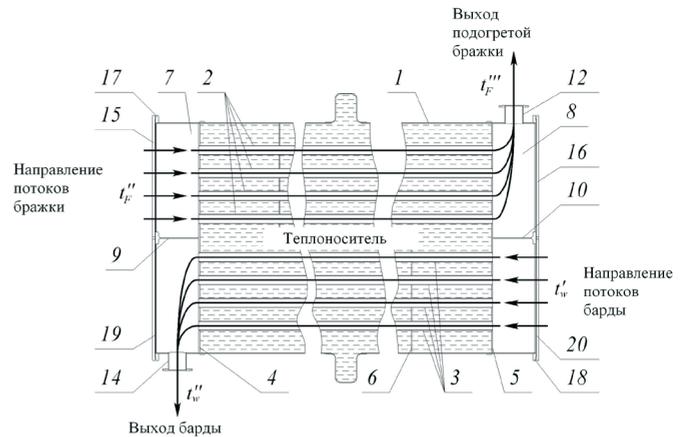
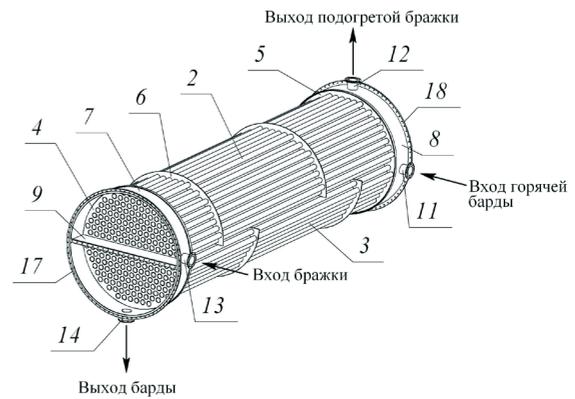


Рис. 3. Устройство и принцип действия комбинированного подогревателя браджа-бражки

навстречу потоку бражки, направляется горячая бражка, отбираемая из куба бражной колонны. В межтрубном пространстве находится жидкий теплоноситель. Теплоноситель за счет конвекции находится в постоянном движении, потоки нагретого нижним пучком труб теплоносителя поднимаются вверх, где отдают тепло верхнему пучку труб, далее потоки охлажденного теплоносителя опускаются вниз и цикл повторяется.

Торцы труб трубных пучков запрессованы в отверстия трубных решеток 4, 5, трубные решетки приварены

к внутренней поверхности обечаек кожуха 1, внутри образованного межтрубного пространства трубы трубных пучков дополнительно удерживаются от провисания и вибрации сегментными трубными деками 6. В этой части конструкция и технология предлагаемого аппарата аналогичны таковым для стандартного кожухотрубного теплообменного оборудования. Два секционированных распределительных устройства 7, 8, расположенных с обоих торцов трубных пучков 2, 3, конструктивно идентичны и имеют внутри по одной секционирующей перегородке 9, 10, расположенной горизонтально, делящей объем каждого распределительного устройства на две камеры. В каждую из камер, каждого из распределительных устройств, вварены штуцеры ввода и вывода барды и бражки 11–14.

Взаимное расположение трубных пучков, перегородок распределительных устройств, входных и выходных штуцеров предполагает обвязку предлагаемого теплообменника «по принципу противотоков». Торцы распределительных устройств закрыты съемными крышками 15, 16, закрепленными посредством фланцев 17, 18, приваренных к торцам обечаек распределительных устройств 7, 8, фланцевые стыки герметизированы прокладками 19, 20.

Моделирование процесса подогрева бражки с использованием комбинированного подогревателя осуществлялось по алгоритму, аналогичному вышеописанному. В качестве исходных данных задавались технологические параметры; определялись теплофизические характеристики барды, бражки, промежуточного теплоносителя и водно-этанольного пара; рассчитывались коэффициенты теплоотдачи от кубовой жидкости к внутренней поверхности труб нижнего пучка комбинированного подогревателя, внутренней поверхности труб верхнего пучка к нагреваемой исходной смеси.

С наружной поверхности труб нижнего и верхнего пучка теплоотдача осуществляется в режиме свободной конвекции. Коэффициент теплоотдачи к промежуточному теплоносителю, находящемуся в межтрубном пространстве,  $\alpha_{пр}$ , находится из критериальной формулы:

$$Nu = 0,5 (Gr Pr),$$

где  $Nu = \frac{\alpha_{пр} \lambda_{пр}}{d_n}$  — число Нуссельта,  $Gr = \frac{g d_n^3}{\nu_{пр}^2} - \beta_{пр} (t_c - \theta)$  — число Грасгофа,  $Pr = \frac{\nu_{пр}}{a_{пр}}$  — число Прандтля,  $g$  — ускорение свободного падения.

Затем определяется температура промежуточного теплоносителя  $\theta$ . В заключительной части программы рассчитываются конечные температуры исходной смеси  $t_F'''$  и кубовой жидкости  $t_W''$ .

Очевидно, что соотношение между площадями поверхности теплообмена бражной  $F_2$  и бардяной  $F_3$  зон

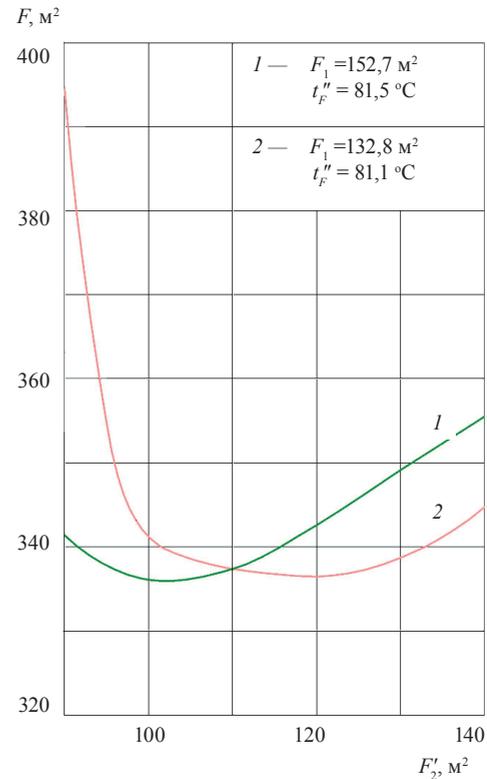


Рис. 4. Зависимость общей поверхности теплообмена от поверхности верхнего пучка труб комбинированного подогревателя

комбинированного подогревателя определяется количеством труб  $n_2$  и  $n_3$  в верхнем и нижнем пучке труб. На рис. 4 представлены зависимости общей поверхности теплообмена  $F$  от поверхности теплообмена бражной зоны для двух значений площади теплообмена бардяной зоны комбинированного подогревателя. Из графика следует, что при определенном соотношении площадей  $F_2$  и  $F_3$  минимальная площадь теплообмена  $F$  составляет  $337 \text{ м}^2$ .

Сравнение двух рассмотренных схем подогрева показывает, что общая поверхность теплообмена во втором варианте на 21 % выше, чем в первом. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, в варианте 1 обеспечивается вынужденное движение теплоносителя циркуляционным насосом, в то время как в варианте 2 процессы теплоотдачи протекают в режиме свободной конвекции, поэтому коэффициенты теплоотдачи для промежуточной жидкости во втором случае существенно ниже, чем в первом. Во-вторых, в варианте 1 обеспечивается противоточная схема движения теплоносителей в теплообменниках (поз. 2, 3), что позволяет получить более высокий температурный напор.

Таблица 1

Сравнительные показатели работы бражного узла БРУ

Показатели процесса	Типовая бражная колонна	Вариант 1	Вариант 2
Расход пара на бражную колонну, кг/дал абс. этанола	24	20	21
Температура бражки на входе в колонну, °C	80	90	88
Концентрация органических кислот в конечном продукте, мг/дм <sup>3</sup>	7,0	5,0	5,5
Потери этанола в барде, % об.	0,015	0,008	0,01

Таким образом, к преимуществам первого варианта подогрева бражки относится меньшая суммарная поверхность теплообмена и возможность использования стандартного теплообменного оборудования. Недостатком этого способа является необходимость установки циркуляционного насоса. Целесообразность применения каждого варианта подогрева бражки должна устанавливаться технико-экономическим расчетом.

Производственные испытания описанных выше способов подогрева питания бражной колонны были проведены в цехе брагоректификации Веселолопанского спиртового завода. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Как следует из приведенных данных, применение предложенных способов дополнительного подогрева бражки позволяет получать ректифицированный этанол лучшего качества и с меньшими энергозатратами по сравнению с типовыми БРУ.

### Список литературы

1. Никитина С. Ю. Схемотехника и методики расчетов брагоректификационных установок. — Воронеж: ВГАСУ, 2013. 209 с.
2. Леонтьев В. С. Энергетическая оптимизация многоколонных ректификационных комплексов [электронный ресурс] // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. 2012. № 2. Режим доступа: [http://ogbus.ru/authors/Leontiev/Leontiev\\_3.pdf](http://ogbus.ru/authors/Leontiev/Leontiev_3.pdf)
3. Терновский Н. С. и др. Ресурсосберегающая технология в производстве спирта. — М.: Пищ. пром-сть, 1994. 167 с.
4. Патент № 2361909 РФ, МПК C12F3/00. Способ подачи тепловых потоков при получении ректифицированного спирта в брагоректификационной установке / А. Ю. Радостев; опубл. 20.07.2008.
5. Патент № 2475471 РФ, МПК C07C31/08, B01D3/14, C12P7/06, C12G3/12, C07C29/80. Способ и установка для производства ректифицированного этилового спирта / В. Г. Буряков, И. В. Сергиенко, А. Н. Ходзинский; опубл. 20.02.2013.
6. Патент РФ на полезную модель № 139161. Устройство для подогрева бражки теплом барды с промежуточным теплоносителем / Никитина С. Ю., Никитин А. А., Гречаный Д. А.; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10.
7. Патент № 2553324 РФ, МПК C12P7/06, C12F3/10, F28D15/00. Способ подогрева бражки теплом барды посредством промежуточного теплоносителя / Никитина С. Ю., Никитин А. А.; опубл. 10.06.2015.
8. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика: учебник для вузов. — М.: МЭИ, 2008. 417 с.
9. Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С. Оптимизация процесса сушки фильтрата послеспиритовой барды // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 4 (58). С. 22–25.
10. Овчинников Ю. В. Основы технической термодинамики. Новосибирск: НГТУ, 2010. 292 с.
11. Цыганков, П. С. Ректификационные установки в спиртовой промышленности. — М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1984. 336 с.

### References

1. Nikitina S. Yu. Circuit design and calculation methods WRA. — Voronezh: VGASU, 2013. 209 p. (in Russian)
2. Leont'ev V. S. Power optimization of multicolumn rectifying complexes [electronic resource]. *Neftegazovoe delo: elektron. nauch. zhurnal*. 2012. No 2. Access mode: [http://ogbus.ru/authors/Leontiev/Leontiev\\_3.pdf](http://ogbus.ru/authors/Leontiev/Leontiev_3.pdf) (in Russian)
3. Ternovskii N. S. et al. Resource-saving technology in production of alcohol. Moscow, 1994. 167 p. (in Russian)
4. Patent No 2361909 RF, MPK C12F3/00. Way of giving of thermal streams when receiving the rectified alcohol in WRA / A. Yu. Radostev; publ. 20.07.2008. (in Russian)
5. Patent No 2475471 RF, MPK C07C31/08, B01D3/14, C12P7/06, C12G3/12, C07C29/80. Way and installation for production of the rectified ethyl alcohol / V. G. Buryakov, I. V. Sergienko, A. N. Khodzinskii; publ. 20.02.2013. (in Russian)
6. Patent Russian Federation for useful model No 139161. The device for heating of a brazhka heat bards with the intermediate heat carrier / Nikitina S. Yu., Nikitin A. A., Grechanyi D. A.; opubl. 10.04.2014, Byul. No10. (in Russian)
7. Patent No 2553324 RF, MPK S12R7/06, S12F3/10, F28D15/00. Way of heating of a brazhka heat bards by means of the intermediate heat carrier / S. Yu. Nikitina, A. A. Nikitin; opubl. 10.06.2015. (in Russian)
8. Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheindlin A. E. Technical thermodynamics: the textbook for higher education institutions. Moscow, MEI, 2008. 417 p. (in Russian)
9. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Murav'ev A. S. Optimization of process of drying of a filtrate postspirit bards. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*. 2013. No 4 (58). p. 22–25. (in Russian)
10. Ovchinnikov Yu. V. Fundamentals of technical thermodynamics. Novosibirsk: NGTU, 2010. 292 p. (in Russian)
11. Tsygankov P. S. Rectifying installations in the spirit industry. Moscow, 1984. 336 p. (in Russian)

## О Перечне рецензируемых научных изданий

В соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г., **1 декабря 2015 г.** сформирован Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издания, текущие номера которых или их переводные версии входят хотя бы в одну из международных реферативных баз данных и систем цитирования Web of Science, Scopus, Astrophysics Data System, PubMed, MathSciNet, zbMATH, Chemical Abstracts, Springer, Agris или GeoRef считаются входящими в Перечень по отраслям науки, соответствующим их профилю.

**Вестник Международной академии холода** включен в Перечень двум международным базам: **Agris (Agricultural Research Information System) и Chemical Abstracts.**