

УДК 66.015.23

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ДИАБАТИЧЕСКИХ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОННАХ

© *Н.А. Войнов\*, Д.А. Земцов, А.В. Богаткова, Н.В. Дерягина*

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037 (Россия), e-mail: info@sibsau.ru*

Исследовался теплообмен в диабатической колонне при ректификации смеси этанол-вода, в которой осуществлялась частичная конденсация восходящих паров на поверхности теплообменных труб, установленных вертикально по высоте установки, а также испарение промежуточного конденсата на поверхности горизонтальных пластин.

На основании проведенного обзора диабатических колонн показано, что они позволяют снизить затраты на ведение процесса ректификации.

Рассмотрены теплообменные устройства, размещенные на тарелках ректификационных установок, и предложены пути по интенсификации теплообмена в них.

Установлено, что наиболее эффективный теплосъем в теплообменниках диабатических колонн достигается при использовании пленочного течения теплоносителя на теплопередающей поверхности.

Исследована теплоотдача в диабатической колонне при гравитационном стекании пленки по поверхности теплообменных труб, а также при организации восходящего и нисходящего прямоточного пленочного течения, как в случае нагревания, так и кипения теплоносителя.

Для интенсификации теплоотдачи в пленке теплоносителя на поверхности труб устанавливалась винтовая искусственная шероховатость, выполненная в виде проволочной спирали, плотно установленной на теплопередающей поверхности. Определены геометрические параметры винтовой шероховатости, такие как расстояние между витками спирали и высота проволоки, оказывающие наибольшее влияние на интенсивность теплообмена.

Представлены зависимости для определения величины коэффициента теплоотдачи и дана оценка величины удельного теплового потока в диабатической колонне.

*Ключевые слова:* ректификация, теплообмен, диабатическая колонна, интенсификация, искусственная шероховатость, пленка жидкости, восходящий и нисходящий прямоток, кипение, нагревание.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективного научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (Номер темы FEFE-2020-0016).*

### **Введение**

Ректификация широко используется в технологиях переработки растительного сырья для разделения смесей с целью получения продуктов различного назначения. В связи с высокой энергоемкостью процесса [1–4] постоянно ведется поиск способов ректификации, обеспечивающих снижение энергозатрат.

В этой связи большой интерес представляют неадиабатная ректификация, осуществляемая в диабатических колоннах [5–10], в которых отвод или подвод тепла осуществляется в теплообменниках, размещенных на тарелках.

Экономия энергии при неадиабатической ректификации происходит за счет частичной теплоотдачи

*Войнов Николай Александрович* – доктор технических наук, профессор, e-mail: n.a.voinov@mail.ru

*Земцов Денис Андреевич* – кандидат технических наук, e-mail: denis\_zemtsov.92@mail.ru

*Богаткова Анастасия Викторовна* – аспирант, e-mail: Sonchic-Sveta@yandex.ru

*Дерягина Нина Владимировна* – старший преподаватель, e-mail: gavgolenko@mail.ru

на входе или выходе установки при умеренной температурной нагрузке, что позволяет использовать более дешевые теплоносители [11, 12].

Литературный обзор по расчету энергетического баланса таких колонн показывает, что диабатические колонны с теплообменниками по высоте

\* Автор, с которым следует вести переписку.

значительно снижают эксергию за счет уменьшения разницы температур между теплоносителем и паром на ступени [13–15]. Некоторые из этих устройств были ранее изучены [16] и вызывают большой интерес [17–19].

Частичная конденсация восходящих паров на поверхности вертикальной трубы и испарение промежуточного конденсата на поверхности пластин обеспечивает обогащение водно-спиртовых смесей [20, 21]. Первоначальные исследования [22–25] показали положительное влияние частичной конденсации на эффективность тарелки и колонны в целом.

Так как эффективность разделения в диабатических колоннах во многом зависит от работы теплообменников, размещенных на тарелках к этим устройствам, предъявляются определенные требования.

Они должны обеспечивать при ведении процесса ректификации варьирование величиной коэффициента теплоотдачи в широком интервале их значений. Осуществлять комбинированный теплосъем, включающий нагревание, кипение и испарение как при противоточном движении теплоносителя, так и при прямоточном. Обеспечивать требуемый теплосъем при изменяющейся по высоте колонны температурной нагрузке, а также поддерживать температуру полученного конденсата (флегмы), близкой к температуре кипения разделяемой смеси.

Теплообменники должны иметь простую конструкцию, небольшие габариты, с минимальным количеством технологических патрубков, а в ряде случаев снабжены компенсаторами температурных напряжений. Также необходимо обеспечивать хорошие условия эксплуатации и безопасность процесса. Легко встраиваться на тарелке, не мешая тепломассообмену на ней. Сконструированы с возможностью изменения поверхности теплообмена в зависимости от изменения производительности колонны.

В качестве теплообменных устройств в рассматриваемых колоннах широко используются теплообменные рубашки на корпусе, встроенные и выносные кожухотрубчатые и змеевиковые теплообменники.

Основным недостатком вышеперечисленных теплообменных устройств является их низкая эффективность по величине теплосъема. Величина коэффициента теплоотдачи со стороны подводимого теплоносителя составляет не более  $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , что обуславливает большие габариты и металлоемкость теплообменников, не позволяет компактно размещать их на тарелках. А использование выносных теплообменников вызывает большие потери тепла, повышает металлоемкость установки в целом. Также затруднена регулировка тепловой нагрузки по тарелкам и оптимизация процесса ректификации.

Наиболее перспективными теплообменниками для осуществления теплопереноса на тарелках диабатических колонн являются [20, 21] устройства, выполненные из труб, вертикально установленные по высоте колонны.

Рассматриваемые теплообменные устройства просты в изготовлении, неметаллоемки и компактны, что позволяет размещать их на тарелках, не оказывая существенного влияния на гидродинамику и массообмен. В них легко устраняются температурные напряжения путем установки на поверхности труб линзового компенсатора, например выполненного из гофрированного элемента. Можно реализовывать различные варианты интенсификации процесса теплоотдачи по высоте колонны, не изменяя их конструкцию.

Наибольший интерес для проведения теплообмена в теплообменных трубах колонны представляет организация пленочного течения на их теплопередающей поверхности [26]: гравитационное стекание, нисходящий и восходящий прямоток.

Гидродинамика и теплообмен в пленках жидкости изучены достаточно хорошо. В настоящей работе рассматривается прикладной аспект применения этих исследований для интенсификации пленочного течения в теплообменниках, установленных в ректификационной колонне.

Как установлено ранее, величина коэффициента теплоотдачи в пленке на порядок больше, чем в однофазном потоке кожухотрубчатого теплообменника, что позволяет при меньшем расходе теплоносителя увеличить удельную тепловую нагрузку и снизить тем самым текущие затраты. А также позволяет проводить комбинированный теплосъем с за счет испарения с поверхности пленки, ее нагревания и кипения одновременно в устройствах по высоте колонны. Перспективным путем интенсификации теплоотдачи в стекающей турбулентной пленке жидкости является нанесение на теплопередающую поверхность винтовой искусственной шероховатости. Осуществление нисходящего или восходящего пленочного течения с образованием высоких касательных напряжений на межфазной поверхности между жидкостью и газом. Создание условий для испарения влаги с поверхности стекающей пленки жидкости, а также обеспечение кипения пленки жидкости путем поддержания пониженного давления в полости теплообменных труб повышает теплосъем.

Цель работы: исследование интенсификации теплообмена в пленке теплоносителя на поверхности теплообменных труб диабатической колонны.

### Экспериментальная часть

Методика экспериментального определения величины коэффициента теплоотдачи в пленке теплоносителя в теплообменных трубах представлена нами в работе [27]. Измерение температуры осуществлялось термометрами сопротивления марки ТСМ-9418. Данные температуры выводились на вторичные приборы марки Термодат 35ЦО/ГВС и при помощи компьютерной программы Termonet 1.01 заносились в базу компьютера. Тепловой поток составил  $q = 20\text{--}250 \text{ кВт/м}^2$ , нагрузки по жидкости изменялась от  $0.2$  до  $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ , расход воздуха для создания восходящего или нисходящего потока достигал до  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Пленочное течение осуществлялось на поверхности труб, выполненных из меди. Длина труб составила  $l = 1.8 \text{ м}$ , а их диаметр  $d = 22\text{--}38 \text{ мм}$ . Искусственная шероховатость на поверхности теплообменных труб обеспечивалась винтовой спиралью, выполненной из проволоки диаметром  $h$ , плотно прилегающей к внутренней поверхности трубы. При исследованиях в установке осуществлялся процесс ректификации смеси этанол-вода с массовой концентрацией летучего компонента  $70\text{--}85\%$ .

При работе установки (рис. 1) поднимающиеся пары смеси из куба частично конденсировались на наружной поверхности вертикально установленных теплообменных труб 4, пропущенных через тарелки, в данном случае выполненной из пластин. При изучении теплосъема при кипении гравитационно стекающей пленки вода подавалась в теплообменные трубы сверху через распределитель 11, а в полости труб обеспечивалось разрежение при помощи вакуум насоса 7, подключенного к емкости 8. При изучении теплообмена в восходящей пленке воды во внутреннюю полость теплообменных труб подавался воздух вентилятором 9.

### Обсуждение результатов исследования

Результаты исследования теплоотдачи в пленке, стекающей по поверхности трубы с винтовой шероховатостью с оптимальным шагом  $s/h = 6\text{--}8$  и разной высотой выступа  $h$ , представлены на рисунке 2.

Согласно экспериментальным данным, винтовая шероховатость позволила увеличить величину коэффициента теплоотдачи в два раза. При этом максимальная интенсивность теплоотдачи достигалась при высоте выступа шероховатости  $0.13 \text{ мм}$ .

Снижение величины коэффициента теплоотдачи в гравитационно стекающей пленке при  $h > 0.13 \text{ мм}$  можно объяснить образованием пузырьков воздуха во впадинах шероховатости, которые приводили к снижению теплопроводности газожидкостной смеси. Механизм образования газосодержания в пленке обосновано нами в работе [28]. Газосодержание в пленке жидкости, стекающей по поверхности трубы с искусственной шероховатостью, обусловлено перемещением газа с межфазной поверхности в локальные зоны обратных токов жидкости с пониженным давлением.

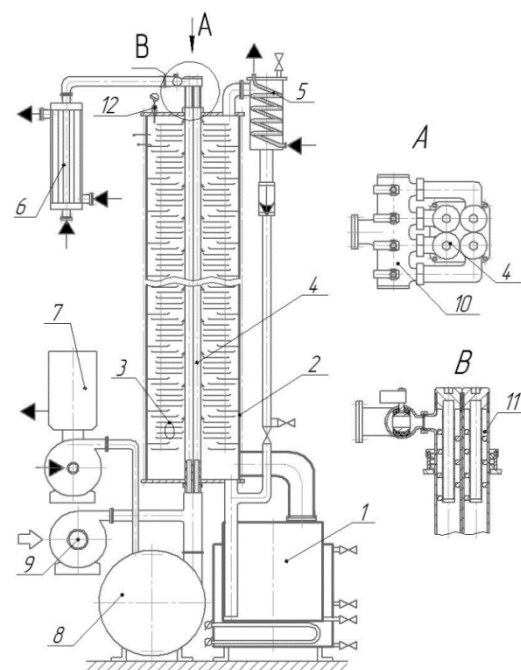


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – куб; 2 – корпус; 3 – тарелка; 4 – теплообменные трубы; 5 – конденсатор; 6 – теплообменник; 7 – вакуум-насос; 8 – емкость; 9 – вентилятор; 10 – коллектор; 11 – пленочный распределитель жидкости; 12 – термометр;  $\rightarrow$  – дистиллят;  $\rightarrow$  – вода;  $\rightarrow$  – воздух

В этой связи для расчета коэффициента теплоотдачи в стекающей пленке жидкости по поверхности с искусственной крупномасштабной шероховатостью предложена зависимость, учитывающая газосодержание.

$$\text{Nu}^* = \alpha \cdot \delta_{\text{вп}} / \lambda_{\text{см}} = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.6}, \quad (1)$$

где  $\text{Re} = 4\Gamma/v$  – число Рейнольдса пленки жидкости;  $\text{Pr} = \nu/a$  – число Прандтля при температуре жидкости;  $\lambda_{\text{см}}$  – коэффициент теплопроводности газожидкостной смеси, Вт/(м·К),  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta_{\text{вп}}$  – толщина пленки во впадине винтовой шероховатости, м.

Результаты исследования теплоотдачи при нисходящем и восходящем пленочном течении представлены на рисунке 3.

При нисходящем прямотоке в области слабых взаимодействий (рис. 3, точки 1–3) с увеличением расхода газа наблюдается уменьшение значений коэффициента теплоотдачи, что, возможно, вызвано формированием волновой структуры пленки. В рассматриваемой области течения величина  $\alpha$  может быть рассчитана по уравнению

$$\text{Nu} = 0,011 \cdot \text{Re}^{0.39} \cdot \text{Re}_{\text{го}}^{-0.16} \cdot \text{Pr}^{0.78}, \quad (2)$$

где  $\text{Nu} = \alpha \cdot \theta / \lambda$  – число Нуссельта;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в пленке, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\theta = (v^2/g)^{0.33}$  – приведенная толщина пленки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К);  $\text{Re}$  – число Рейнольдса пленки;  $\text{Re}_{\text{го}}$  – относительное число Рейнольдса газа;  $\text{Pr}$  – число Прандтля.

При увеличении расхода воздуха и сравнительно небольшой доле уноса ( $E_0 \leq 15\%$ ) жидкости с поверхности пленки (кольцевой режим течения, область II, на рисунке 3), когда суммарная поверхность капель незначительна по сравнению с поверхностью пленки и влиянием испарения влаги на конечную температуру нагреваемой жидкости (по сравнению с влиянием касательных напряжений на межфазной поверхности) можно пренебречь, опытные значения коэффициента теплоотдачи подчиняются следующей эмпирической зависимости:

$$\text{Nu} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Re}^{0.39} \cdot \text{Re}_{\text{го}}^{0.94} \cdot \text{Pr}^{0.78}, \quad (3)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса пленки на участке динамического равновесия;  $\text{Re}_{\text{го}}$  – относительное число Рейнольдса газа;  $\text{Pr}$  – число Прандтля.

В дисперсно-кольцевом режиме из-за увеличения брызгоуноса (область III, рис. 3) наблюдается снижение  $\alpha$  вследствие уменьшения числа Рейнольдса жидкости по длине трубы и наличия капель в потоке газа. Снижение плотности орошения уменьшает величину коэффициента теплоотдачи, а наличие в газовой фазе капель приводит к изменению конечной температуры нагреваемой жидкости за счет испарения влаги с ее поверхности, а также гашению турбулентных пульсаций в газовой фазе и, следовательно, уменьшению касательных напряжений на межфазной поверхности, что и снижает интенсивность теплоотдачи.

При восходящем прямотоке (рис. 3, точки 4 и 5) значения коэффициента теплоотдачи слабо изменяются с увеличением расхода газа и сопоставимы со значениями, полученными при нисходящем прямотоке.

Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи при сильных взаимодействиях по сравнению с гравитационным стеканием пленки по гидравлически гладкой поверхности трубы составило в 2 раза. Организация сильных взаимодействий при пленочном течении в трубе с искусственной шероховатостью на ее наружной поверхности, как показали наши исследования, приводит к резкому снижению теплоотдачи.

Результаты исследования теплоотдачи в пленке воды при кипении, стекающей по поверхности трубы с искусственной шероховатостью, представлены на рисунке 4. Как установлено, с увеличением высоты выступа винтовой шероховатости, несмотря на увеличение в жидкости паросодержания, величина коэффициента теплоотдачи повышается. Максимальное увеличение теплоотдачи в 1.7 раза достигнуто при  $h = 1.5$  мм.

Снижение коэффициента теплоотдачи с увеличением перепада температуры  $\Delta t$  вызвано влиянием на процесс кипения интенсивности испарения влаги с поверхности пленки. С увеличением разности температур происходит отток пара с поверхности пленки, что приводит к увеличению влагосодержания в воздухе над поверхностью пленки и снижению интенсивности теплосъема.

Максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи в пленке при кипении и  $\Delta t > 25$  °С составило 1.7 раза. Установлено также, что искусственная шероховатость, размещенная на поверхности труб, не только интенсифицирует теплоотдачу, но и обеспечивает устойчивое пленочное течение и устраняет образование несмоченных участков на поверхности.

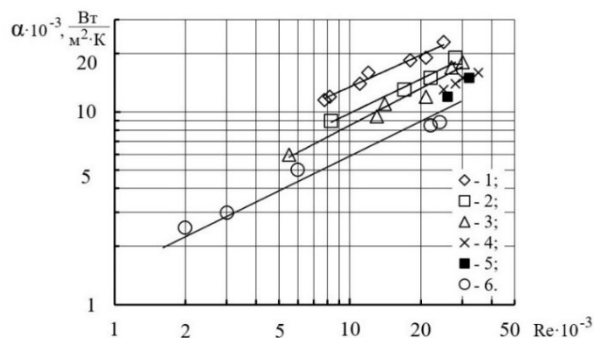


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от числа Рейнольдса  $Re$  жидкости при  $d = 30$  мм;  $l = 1.8$  м;  $Pr = 4.5$ ;  $s/h = 6-8$ ; пленка на наружной поверхности трубы; точки: 1 –  $h = 0.13$  мм; 2 – 0.3; 3 – 0.7; 4 – 0.85; 5 – 1.0; 6 – 1.5

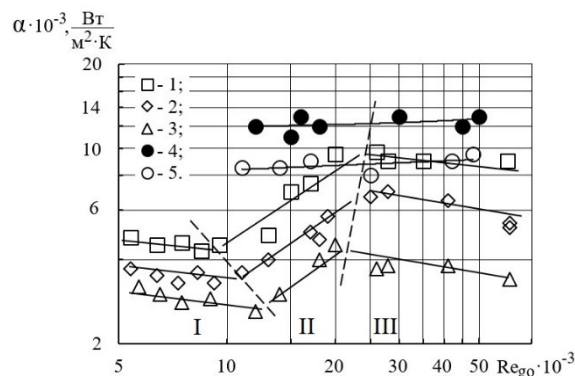
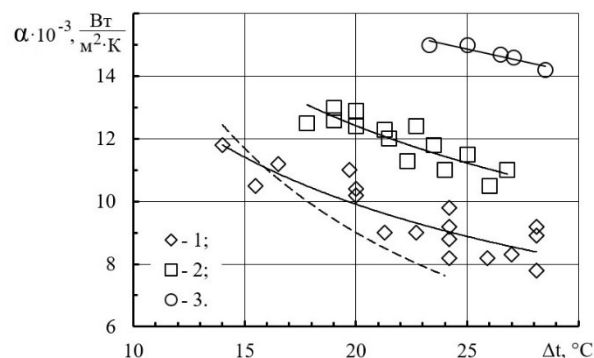


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи при нисходящем и восходящем прямом токе от относительного критерия Рейнольдса газа  $Re_{go}$  при  $d=27$  мм,  $l=1.8$  м. Экспериментальные точки (1–4): 1 –  $\Gamma=1.3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с,  $Pr=5.9$ ; 2 –  $0.83 \cdot 10^{-3}$ , 5.8; 3 –  $0.47 \cdot 10^{-3}$ , 5.5; 4 –  $\Gamma=1.3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с, 5.9; 5 –  $\Gamma=0.8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с, 5.0. I – область слабых взаимодействий, II – кольцевой режим течения, III – дисперсно-кольцевой режим

Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  при кипении от средней разности температуры при стекании пленки воды по поверхности с винтовой шероховатостью: при  $d = 20$  мм,  $Re = 11000-18000$ ,  $q = 250000$  Вт/м<sup>2</sup>,  $s/h = 6-10$ . Пунктирная линия – гладкая поверхность трубы. Экспериментальные точки (1–3): 1 –  $h = 0.15$  мм; 2 –  $h = 0.25$  мм; 3 –  $h = 1.5$  мм



Интенсификация теплосъема в стекающей пленке при кипении может также достигаться [29] путем вращения пленки жидкости на теплопередающей поверхности. В этом случае интенсивность теплоотдачи была увеличена на порядок.

### Заключение

Экспериментально установлено, что применение пленочного течения в теплообменных трубах диабатических колонн позволяет на порядок интенсифицировать процесс теплосъема по сравнению однофазным потоком.

Применение винтовой искусственной шероховатости на теплопередающей поверхности, а также использование сильных взаимодействий между газом и пленкой жидкости обеспечивает увеличение коэффициента теплоотдачи в 1.7–2 раза.

Удельная тепловая нагрузка с поверхности теплообменных труб диабатической колонны при укреплении смеси этанол-вода составила 50–150 кВт/м<sup>2</sup>·К.

Представленные данные востребованы при конструировании диабатических колонн для производства этанола, скипидара и других продуктов, получаемых в технологиях переработки биомассы древесины.

### Список литературы

1. Agrawal R., Babi D.K., Blagov S., Caballero J.A., Gani R., Gmehling J., Grossmann I.E., Harwardt A., Jobson M., Kenig E.Y., Kleiber M., Kockmann N., Kooijman H.A., Marquardt W., Shah V.H., Skiborowski M., Sorensen E., Taylor R. List of Contributors. Academic Press, Boston, 2014. Pp. xi–xii. DOI: 10.1016/B978-0-12-386547-2.01002-4.

2. Kiss A.A., Flores Landaeta S.J., Infante Ferreira C.A. Towards energy efficient distillation technologies – Making the right choice // *Energy*. 2012. Vol. 47. Pp. 531–542. DOI: 10.1016/j.energy.2012.09.038.
3. Ognisty T.P. Analyze distillation columns with thermodynamics // *Chemical Engineering Progress (United States)*. 1995. Vol. 91. P. 2.
4. Kiss A.A. Design, Control and Economics of Distillation // *Advanced Distillation Technologies*. 2013. Pp. 37–65. DOI: 10.1002/9781118543702.ch2.
5. Le Goff P., Cachot T., Rivero R. Exergy analysis of distillation processes // *Chemical Engineering and Technology*. 1996. Vol. 19. Pp. 478–485. DOI: 10.1002/ceat.270190603.
6. Saunar E., Rivero R., Kjelstrup S., Lien K.M. Diabatic column optimization compared to isoforce columns // *Energy Conversion and Management*. 1997. Vol. 38. Pp. 1777–1783. DOI: 10.1016/s0196-8904(96)00201-4.
7. Rivero R., Garcia M., Urquiza J. Simulation, exergy analysis and application of diabatic distillation to a tertiary amyl methyl ether production unit of a crude oil refinery // *Energy*. 2004. Vol. 29. Pp. 467–489. DOI: 10.1016/j.energy.2003.10.007.
8. Røsjorde A., Kjelstrup S. The second law optimal state of a diabatic binary tray distillation column // *Chemical Engineering Science*. 2005. Vol. 60. Pp. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.ces.2004.09.059.
9. Schaller M., Hoffmann K.H., Siragusa G., Salamon P., Andresen B. Numerically optimized performance of diabatic distillation columns // *Computers and Chemical Engineering*. 2001. Vol. 25. Pp. 1537–1548. DOI: 10.1016/S0098-1354(01)00717-7.
10. Olujic Z., Fakhri F., De Rijke A., De Graauw J., Jansens P.J. Internal heat integration – The key to an energy-conserving distillation column // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2003. Vol. 78. Pp. 241–248. DOI: 10.1002/jctb.761.
11. Kiss A.A. Distillation technology – still young and full of breakthrough opportunities // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2014. Vol. 89. Pp. 479–498.
12. Olujic Ž., Jödecke M., Shilkin A., Schuch G., Kaibel B. Equipment improvement trends in distillation // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2009. Vol. 48. Pp. 1089–1104.
13. Agrawal R., Fidkowski Z.T. On the use of intermediate reboilers in the rectifying section and condensers in the stripping section of a distillation column // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1996. Vol. 35. Pp. 2801–2807.
14. Jimenez E.S., Salamon P., Rivero R., Rendon C., Hoffmann K.H., Schaller M., Andreev B. Optimization of a diabatic distillation column with sequential heat exchangers // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 43. Pp. 7566–7571.
15. Calzon-McConville C.J., Rosales-Zamora M.B., Hernández S., Segovia-Hernández J.G., Rico-Ramírez V. Design and optimization of thermally coupled distillation schemes for the separation of multicomponent mixtures // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2006. Vol. 45. Pp. 724–732.
16. Fonyo Z. Thermodynamic analysis of rectification – 1. Reversible model of rectification // *Int. Chem. Eng.* 1974. Vol. 14. Pp. 18–27.
17. Rivero R. Exergy simulation and optimization of adiabatic and diabatic binary distillation // *Energy*. 2001. Vol. 26. Pp. 561–593.
18. De Koeijer G., Røsjorde A., Kjelstrup S. Distribution of heat exchange in optimum diabatic distillation columns // *Energy*. 2004. Vol. 29. Pp. 2425–2440.
19. De Koeijer G.M., Kjelstrup S., Salamon P., Siragusa G., Schaller M., Hoffmann K.H. Comparison of entropy production rate minimization methods for binary diabatic distillation // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2002. Vol. 41. Pp. 5826–5834.
20. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Pan'kov V.A. Study of Thermal Fractionation Columns // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 52. Pp. 515–524.
21. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Zhukova O.P. Study of thermal rectification in a column with low mass transfer on the steps // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017. Vol. 51. Pp. 191–199.
22. Kirschbaum E., Tröster E. Untersuchungen zum Stoffübergang bei der Teilkondensation von Gemischdämpfen // *Chemie Ingenieur Technik*. 1960. Vol. 32. Pp. 395–400.
23. Blaß E. Die Kondensation von binären Dampfgemischen // *Chemie Ingenieur Technik*. 1973. Vol. 45. Pp. 865–872.
24. Ito A., Asano K. Thermal effects in non-adiabatic binary distillation effects of partial condensation of mixed vapors on the rates of heat and mass transfer and prediction of H. T. U. // *Chemical Engineering Science*. 1982. Vol. 37. Pp. 1007–1014.
25. Cave S.D., Mazzarotta B., Sebastiani E. Mathematical model for process design and simulation of dephlegmators (partial condensers) for binary mixtures // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1987. Vol. 65 (4). Pp. 559–564. DOI: 10.1002/cjce.5450650405
26. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. М.: Энергия, 1974. 408 с.
27. Voinov N.A., Zhukova O.P., Nikolaev A.N. Heat transfer in condensation and boiling in a tubular film evaporator // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 46. Pp. 359–367. DOI: 10.1134/S0040579512030104.
28. Войнов Н.А., Фролов А.С., Жукова О.П. Анализ параметров обратных токов и газосодержания в жидкости за выступом шероховатости // *Теоретические основы химической технологии*. 2019. Т. 53. №2. С. 160–167. DOI: 10.1134/S0040357119010172
29. Войнов Н.А., Жукова О.П., Кожухова Н.Ю., Богаткова А.В., Дерягина Н.В. Интенсификация теплообмена в пленочном испарителе // *Хвойные борельной зоны*. 2018. Т. 36. №1. С. 28–31.

*Поступила в редакцию 5 октября 2020 г.*

*Принята к публикации 13 ноября 2020 г.*

**Для цитирования:** Войнов Н.А., Земцов Д.А., Богаткова А.В., Дерягина Н.В. Интенсификация теплообмена в диабатических ректификационных колоннах // *Химия растительного сырья*. 2020. №4. С. 511–518. DOI: 10.14258/jcrpm.2020048580.

*Voinov N.A.\**, *Zemtsov D.A.*, *Bogatkova A.V.*, *Deryagina N.V.* INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE IN DIABATIC RECTIFICATION COLUMNS

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, pr. Krasnoyarsky Rabochy, 31, Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: n.a.voinov@mail.ru*

The heat exchange in a diabatic column was investigated during the rectification of an ethanol-water mixture, in which partial condensation of rising vapors on the surface of vertical heat exchange tubes installed vertically along the height of the installation was carried out, as well as the evaporation of intermediate condensate on the surface of horizontal plates.

Based on the review of diabatic columns, it is shown that they can reduce the cost of conducting the rectification process.

Heat-exchange devices placed on trays of rectification units are considered and ways to intensify heat transfer in them are proposed.

It has been established that the most efficient heat removal in heat exchangers of diabatic columns is achieved when using a film flow of a coolant on a heat transfer surface.

Heat transfer in a diabatic column is investigated during gravitational flow of surfaces of heat exchange tubes, as well as when organizing an ascending and descending co-current film flow, both in the case of heating and boiling of the coolant.

To intensify heat transfer in the coolant film, a helical artificial roughness was installed on the surface of the pipes, made in the form of a wire spiral tightly mounted on the heat transfer surface.

The geometric parameters of the helical roughness, such as the distance between the turns of the spiral and the height of the wire, which have the greatest influence on the intensity of heat transfer, have been established.

Dependences for determining the value of the heat transfer coefficient are presented and an estimate of the value of the specific heat flux in the diabatic column is given.

*Keywords:* rectification, heat exchange, diabatic column, intensification, artificial roughness, liquid film, upward and downward parallel flow, boiling, heating.

### References

1. Agrawal R., Babi D.K., Blagov S., Caballero J.A., Gani R., Gmehling J., Grossmann I.E., Harwardt A., Jobson M., Kenig E.Y., Kleiber M., Kockmann N., Kooijman H.A., Marquardt W., Shah V.H., Skiborowski M., Sorensen E., Taylor R. *List of Contributors*. Academic Press, Boston, 2014, pp. xi–xii. DOI: 10.1016/B978-0-12-386547-2.01002-4.
2. Kiss A.A., Flores Landaeta S.J., Infante Ferreira C.A. *Energy*, 2012, vol. 47, pp. 531–542. DOI: 10.1016/j.energy.2012.09.038.
3. Ognisty T.P. *Chemical Engineering Progress (United States)*, 1995, vol. 91, p. 2.
4. Kiss A.A. *Advanced Distillation Technologies*, 2013, pp. 37–65. DOI: 10.1002/9781118543702.ch2.
5. Le Goff P., Cachot T., Rivero R. *Chemical Engineering and Technology*, 1996, vol. 19, pp. 478–485. DOI: 10.1002/ceat.270190603.
6. Sauar E., Rivero R., Kjelstrup S., Lien K.M. *Energy Conversion and Management*, 1997, vol. 38, pp. 1777–1783. DOI: 10.1016/S0196-8904(96)00201-4.
7. Rivero R., Garcia M., Urquiza J. *Energy*, 2004, vol. 29, pp. 467–489. DOI: 10.1016/j.energy.2003.10.007.
8. Røsjorde A., Kjelstrup S. *Chemical Engineering Science*, 2005, vol. 60, pp. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.ces.2004.09.059.
9. Schaller M., Hoffmann K.H., Siragusa G., Salamon P., Andresen B. *Computers and Chemical Engineering*, 2001, vol. 25, pp. 1537–1548. DOI: 10.1016/S0098-1354(01)00717-7.
10. Olujic Z., Fakhri F., De Rijke A., De Graauw J., Jansens P.J. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003, vol. 78, pp. 241–248. DOI: 10.1002/jctb.761.
11. Kiss A.A. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2014, vol. 89, pp. 479–498.
12. Olujic Z., Jödecke M., Shilkin A., Schuch G., Kaibel B. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, vol. 48, pp. 1089–1104.
13. Agrawal R., Fidkowski Z.T. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1996, vol. 35, pp. 2801–2807.
14. Jimenez E.S., Salamom P., Rivero R., Rendon C., Hoffmann K.H., Schaller M., Andreen B. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2014, vol. 43, pp. 7566–7571.
15. Calzon-McConville C.J., Rosales-Zamora M.B., Hernández S., Segovia-Hernández J.G., Rico-Ramírez V. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2006, vol. 45, pp. 724–732.
16. Fonyo Z. *Int. Chem. Eng.*, 1974, vol. 14, pp. 18–27.
17. Rivero R. *Energy*, 2001, vol. 26, pp. 561–593.
18. De Koeijer G., Røsjorde A., Kjelstrup S. *Energy*, 2004, vol. 29, pp. 2425–2440.
19. De Koeijer G.M., Kjelstrup S., Salamon P., Siragusa G., Schaller M., Hoffmann K.H. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, vol. 41, pp. 5826–5834.
20. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Pan'kov V.A. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 52, pp. 515–524.
21. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Zhukova O.P. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, pp. 191–199.
22. Kirschbaum E., Tröster E. *Chemie Ingenieur Technik*, 1960, vol. 32, pp. 395–400.
23. Blaß E. *Chemie Ingenieur Technik*, 1973, vol. 45, pp. 865–872.
24. Ito A., Asano K. *Chemical Engineering Science*, 1982, vol. 37, pp. 1007–1014.

\* Corresponding author.

25. Cave S.D., Mazzarotta B., Sebastiani E. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1987, vol. 65 (4), pp. 559–564. DOI: 10.1002/cjce.5450650405
26. Kh'yuit Dzh., Khol-Taylor N. *Kol'tsevyye dvukhfaznyye techeniya*. [Ring two-phase flows]. Moscow, 1974, 408 p. (in Russ.).
27. Voinov N.A., Zhukova O.P., Nikolaev A.N. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2012, vol. 46, pp. 359–367. DOI: 10.1134/S0040579512030104.
28. Voynov N.A., Frolov A.S., Zhukova O.P. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. 53, no. 2, pp. 160–167. DOI: 10.1134/S0040357119010172. (in Russ.).
29. Voynov N.A., Zhukova O.P., Kozhukhova N.Yu., Bogatkova A.V., Deryagina N.V. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2018, vol. 36, no. 1, pp. 28–31. (in Russ.).

*Received October 5, 2020*

*Accepted November 13, 2020*

**For citing:** Voinov N.A., Zemtsov D.A., Bogatkova A.V., Deryagina N.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 511–518. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020048580.