

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ И ТЕПЛООТДАЧИ
ВСТРОЕННОГО ДЕФЛЕГМАТОРА РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ
ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ.**

М. М. Баяндина, А. В. Кустов, Я. С. Гончарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

В статье представлено исследование коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи встроенного теплообменника (дефлегматора) ректификационной колонны, применяемой в технологических линиях химической переработки биомассы древесины. Проведено математическое моделирование по влиянию изменения одного из технологических параметров (диаметр трубок теплообменника, материала изготовления теплообменника и охлаждающей жидкости) теплообменника на коэффициент теплоотдачи.

Ректификация широко используется в следующих отраслях: в технологиях комплексной переработки древесины; в лесохимической промышленности при получении продуктов потребления; при восстановлении экстракционных растворов в процессах извлечения биологически активных веществ из растительного сырья; в технологии химической переработки древесины при производстве этанола; при переработке нарастающих природных отходов газификацией и использования синтез-газа для получения биополимера на стадии регенерации растворителей (хлористый метилен, гипохлорит натрия, гексан и т. д.), где также востребованы высокоэффективные и производительные ректификационные колонны.

В большинстве своём, ректификации подлежат многокомпонентные смеси, как правило, азеотропные, имеющие схожую температуру кипения, что объясняет использование для их разделения многоступенчатых ректификационных колонн. При этом применяются различные способы ректификации, такие как азеотропная, экстрактивная, молекулярная, дробная, парциальная.

Ключевые слова: ректификация, теплообмен, дефлегматор, коэффициент теплоотдачи, критерий Рейнольдса, критерий Нуссельта, моделирование, материал.

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 72–78

**INVESTIGATION OF THE HEAT TRANSMISSION AND HEAT TRANSFER COEFFICIENTS
OF THE INTEGRATED DEFLEGMATOR IN DISTILLATION COLUMN DURING
THE PROCESSING OF RAW MATERIALS.**

M. M. Bayandina, A. V. Kustov, Ya. S. Goncharova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

The article presents a study of the coefficients of heat transfer and heat transmission of an integrated heat exchanger (deflegmator) of a distillation column used in technological lines of chemical processing of wood biomass. Mathematical modeling was carried out on the effect of changes in one of the technological parameters (dimeter of the heat exchanger tubes, material of the heat exchanger and coolant) of the heat exchanger on the heat transfer coefficient.

Rectification is widely used in the following industries: in the technologies of complex wood processing; in the forestry industry in the production of consumer products; in the recovery of extraction solutions in the extraction of biologically active substances from plant raw materials; in the technology of chemical processing of wood in the production of ethanol; when processing increasing natural waste by gasification and using synthesis gas to produce a biopolymer at the stage of solvent regeneration (methylene chloride, sodium hypochlorite, hexane, etc.), where highly efficient and productive distillation columns are also in demand.

For the most part, multicomponent mixtures are subject to rectification, usually azeotropic, having a similar boiling point, which explains the use of multi-stage rectification columns for their separation. At the same time, various methods of rectification are used, such as azeotropic, extractive, molecular, fractional, partial.

Keywords: rectification, heat exchange, deflegmator, heat transfer coefficient, Reynolds criterion, Nusselt criterion, modeling, material.

В ректификационных установках очень широкое применение получили теплообменники различных конструкций. Устанавливается два теплообменника. Один из которых, предназначен для частичной конденсации паров и возвращения их в жидкой фазе обратно в колонну для увеличения концентрации головного продукта. Такой теплообменник называется дефлегматор, а сконденсированные пары – флегмой [1; 2; 3].

В лабораторном либо мелкосерийном производстве, для экономии пространства и из-за небольших объемов производства, используется встроенный дефлегматор, выполненный в одном корпусе с ректификационной колонной.

Для малотоннажных ректификационных колонн с целью достижения наибольшей эффективности наиболее целесообразно использование встроенных дефлегматоров. Основное назначение дефлегматора – получение температуры флегмы, близкой к температуре паровой смеси в зоне конденсации. Для сравнения работоспособности таких устройств были изготовлены и исследованы дефлегматоры, схемы которых представлены на рис. 1.

Применение дефлегматора, выполненного в виде кожухотрубчатого теплообменника (рис. 1, а), не позволило получить температуру флегмы, близкую к ее кипению. Разность температуры между конденсатом и контактирующими с ней парами составила $\Delta t = 15\text{--}20^\circ\text{C}$, из-за охлаждения конденсата на поверхности вертикально установленных труб. Кроме того, не обеспечивается компенсация температурных напряжений в сварных швах корпуса и трубок.

Использование дефлегматора с горизонтально размещенными трубами (рис. 1, б) не позволило обес-

печить требуемую поверхность теплообмена из-за достижения больших его габаритов и металлоемкости и, в этой связи, не представляет интереса для дальнейшего совершенствования.

Наиболее эффективным является дефлегматор, выполненный из медных трубок, изготовленных в виде спиралей Архимеда (рис. 1, г), который в настоящее время активно рекламируются в печати. Такая компоновка дефлегматора позволяет обеспечить требуемую поверхность теплообмена при сравнительно малых габаритах, создать дополнительную зону контакта пара с жидкостью, устранить температурные напряжения.

В связи со слабой изученностью процессов, протекающих в дефлегматоре, и отсутствием рекомендаций по его изготовлению, были проведены исследования режимов работы и коэффициентов теплоотдачи.

Поверхность теплообмена дефлегматора составила $F = 0,35\text{ м}^2$, диаметр медных трубок – $8 \times 1\text{ мм}$, количество витков – 5 шт., расстояние между ними – 50 мм, величина зазора между витками – 1,5 мм. Для устранения пленки конденсата с поверхности трубок на них наматывалась медная проволока толщиной 0,1 мм с шагом 35 мм. Внутренний диаметр корпуса дефлегматора составил 120 мм, диаметр насадочной колонны – 100 мм. Кубовая часть колонны емкостью $0,1\text{ м}^3$, была снабжена рубашкой и встроенными в ней электронагревателями мощностью до 10 кВт. Расход подаваемой воды в дефлегматор составил $0,04\text{--}0,2\text{ м}^3/\text{ч}$ при ее начальной температуре $5\text{--}7^\circ\text{C}$. Исследовалась смесь этиловый спирт-вода при начальной концентрации этанола 40 % об.

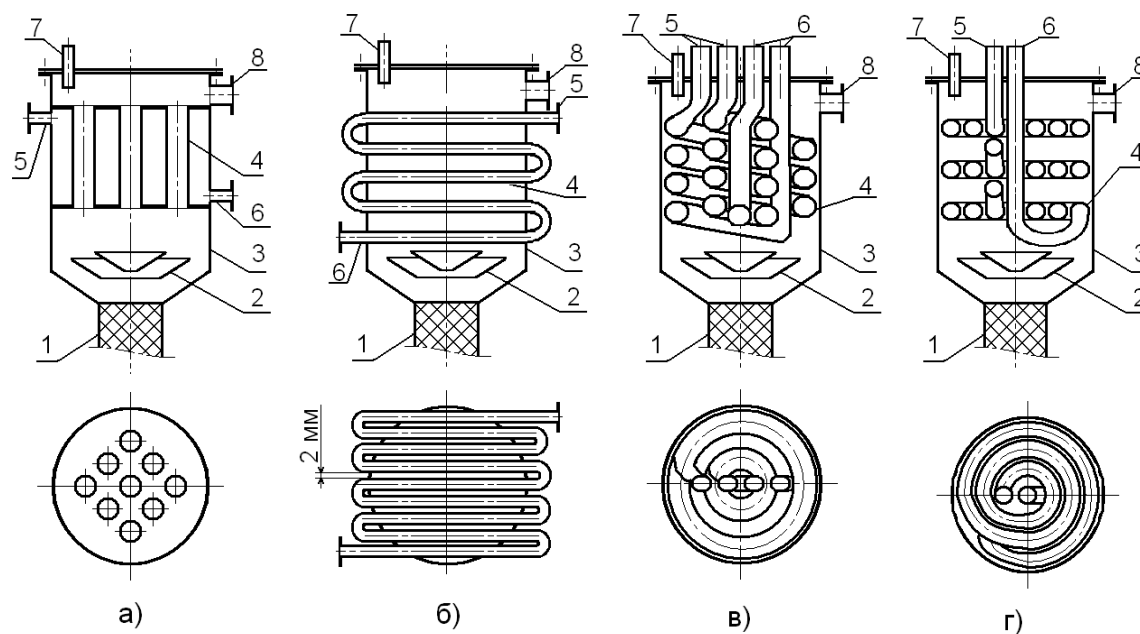


Рис. 1. Схемы встроенных дефлегматоров:

а – вертикальный трубчатый; б – горизонтальный трубчатый; в – змеевиковый; г – из спиралей Архимеда.

1 – колонна; 2 – распределитель конденсата; 3 – корпус дефлегматора; 4 – дефлегматор; 5 – штуцер для входа воды; 6 – штуцер для выхода воды; 7 – гильза под термометр; 8 – штуцер для выхода паров

Коэффициенты теплопередачи (K) и теплоотдачи (α_1) определялись из общеизвестных зависимостей [2]:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}}, \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; F – площадь теплообмена, м^2 ; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя разница между температурами горячего и холодного теплоносителей, К ; δ – толщина стенки, м ; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя (пара) к стенке, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; α_2 – коэффициент теплопередачи от стенки к холодному теплоносителю (вода), $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Исследовались три основные схемы подключения охлаждающей воды к дефлегматору, рис. 2.

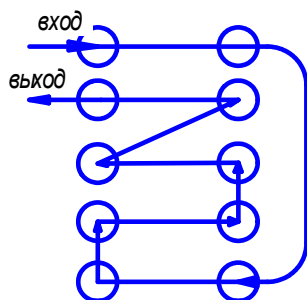


Рис. 2. Схема подключения дефлегматора

При мощности нагревателей 3 кВт, флегмовом числе, равном 3, числе Рейнольдса охлаждающей воды в медных трубках 2500–3000, значения коэффициента теплопередачи составили $K_{\text{оп}} = 300\text{--}400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для конструкции, изображенной на рис. 3. Причем наибольшие значения K получены при работе дефлегматора по схеме, представленной на рис. 4. Величина коэффициента теплоотдачи при конденсации оказалась равной $\alpha_k = 400\text{--}500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (рис. 5).

Снижение величины Δt в дефлегматоре возможно путем увеличения числа Рейнольдса охлаждающей жидкости в дефлегматоре, мощности нагревателей и поверхности дефлегматора. В этой связи, подогрев воды в дополнительном теплообменнике способствует увеличению числа Рейнольдса воды в трубках дефлегматора, что приводит к росту температуры охлаждающей воды на выходе и, следовательно, увеличению температуры флегмы.

Установлено три гидродинамических режима взаимодействия фаз в дефлегматоре: капельный, провальный, захлебывания (рис. 4). При капельном режиме течения наблюдается срыв конденсата в виде капель (диаметром 2–5 мм) с поверхности витков. При расходе жидкости 0,012–0,027 $\text{м}^3/\text{ч}$ и скорости газа в щелях между витками 0,9–1,5 м/с наблюдается режим течения, соответствующий работе провальной тарелки. При скорости газа выше 2 м/с, устанавливается режим подвисяния, дефлегматор заполняется флегмой, с последующим захлебыванием колонны.

Уменьшение мощности нагревателей в колонне ведет к снижению расхода охлаждающей воды в дефлегматоре, что требует при конструировании дефлегматора использования медных труб малого диаметра с целью обеспечения турбулентного режима. В этой связи, применение колонн диаметром менее 80 мм, со встроенным змеевиковым дефлегматором не эффективно, так как из-за низкой тепловой нагрузки не обеспечивается требуемая температура флегмы.



а



б

Рис. 3. Конструкция дефлегматора установленного в колонне опытного производства по получению биополимера:

а – общий вид; б – вид со стороны входа пара

В работах [3; 4] представлены зависимости для определения коэффициентов в следующем виде:

$$y(x) = 2,106 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,099 \cdot x + 6,502 \cdot 10^{-5}, \quad (1)$$

где y – коэффициент теплоотдачи пара; x – критерий Рейнольдса.

Для уточнения зависимости для определения коэффициентов было проведено математическое моделирование по определению зависимостей коэффициентов от критерия Рейнольдса.

На рис. 5 и рис. 6 представлен диаграммы изменения коэффициента Теплопередачи и теплоотдачи при конденсации паров, соответствующего обработке экспериментальных данных.

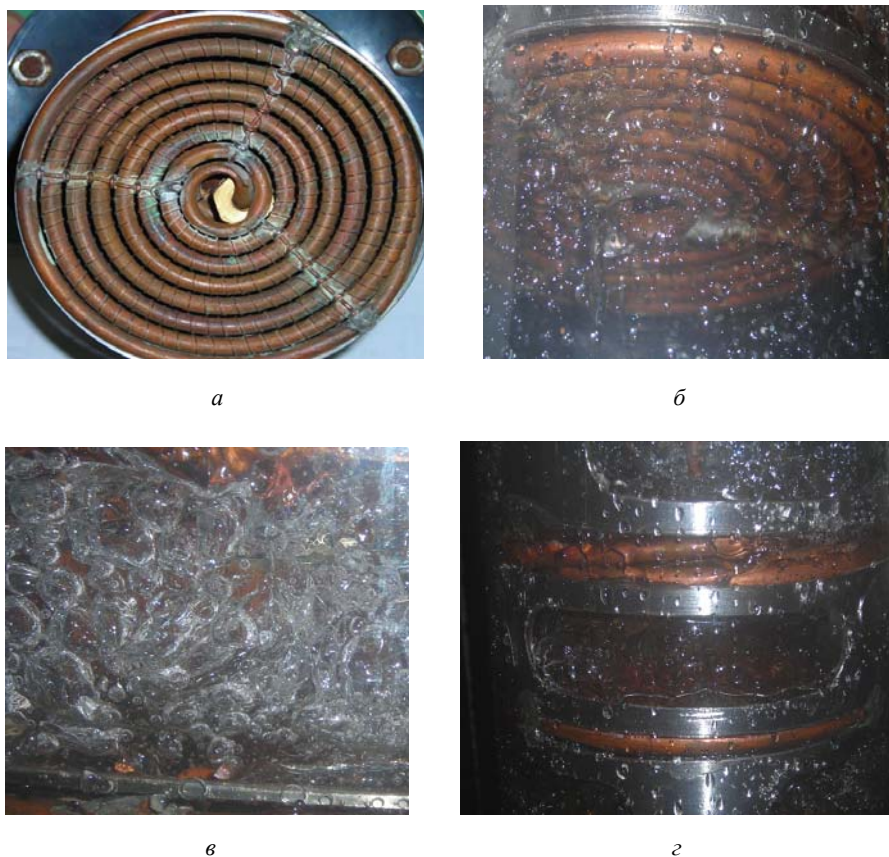


Рис. 4. Режимы движения парожидкостной смеси дефлегматоре:

а – сухие витки дефлегматора; *б* – капельный режим; *в* – провальный; *г* – захлебывания

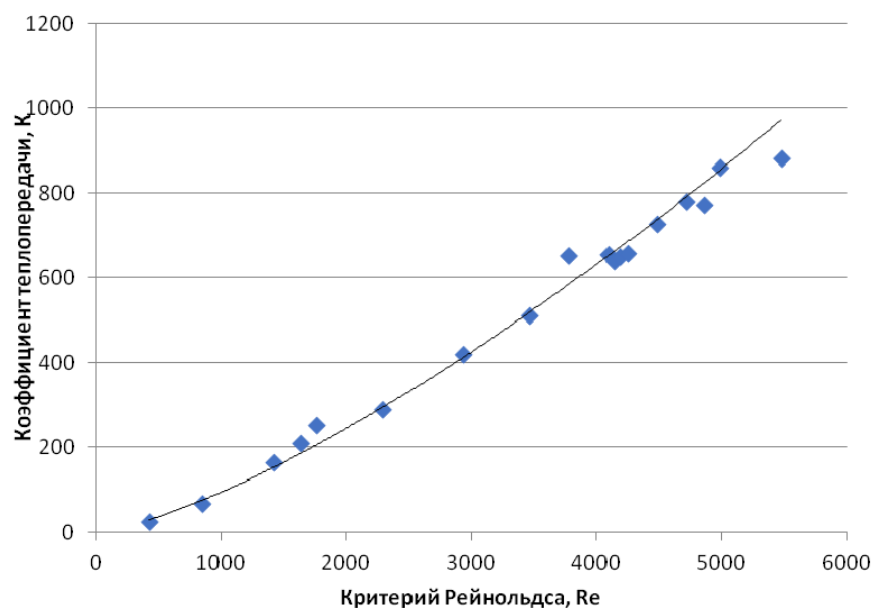


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи от значения критерия Рейнольдса

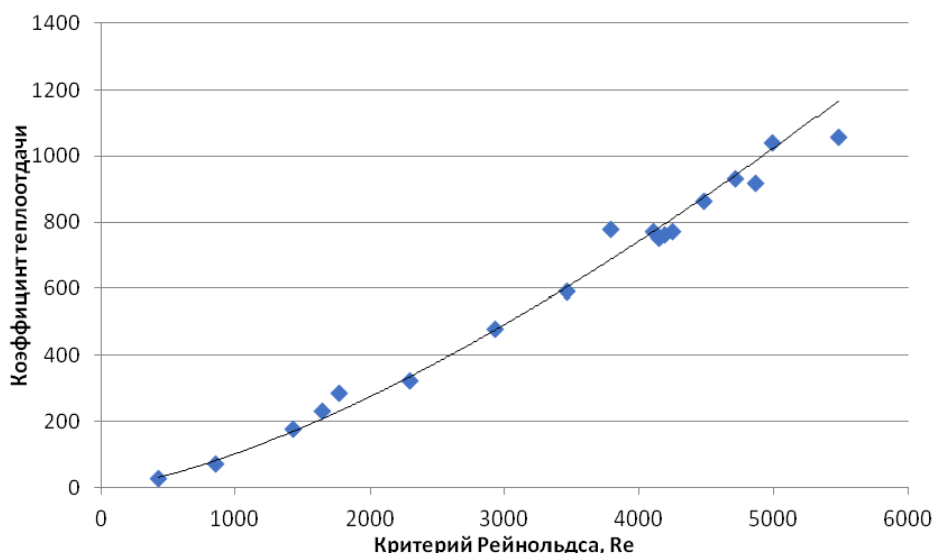


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи горячего теплоносителя от значения критерия Рейнольдса

На основе анализа имеющихся экспериментальных данных и полученных графиков было установлено:

$$K \sim Re^{1,37}, \alpha_1 \sim Re^{1,43}$$

Учитывая, что критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2)$$

Получены расчетные зависимости для определения коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи

$$\alpha_1 = 0,007 \times \left(\frac{G}{d \times v} \right)^{1,43}, \quad (3)$$

$$K = 0,0073 \times \left(\frac{G}{d \times v} \right)^{1,37}. \quad (4)$$

Расчеты по приведенным формулам (3) и (4) представлены на рис. 2 и рис. 3 в виде прямой линии. Расхождения между расчетными данными и экспериментальными составили в пределах 3,5 %.

После этого было проведено математическое моделирование по определению коэффициента теплоотдачи (α_1) в зависимости от материала изготовления дефлегматора.

В качестве материалов использовались следующие материалы (см. таблицу).

Характерные значения определения коэффициента теплоотдачи представлены на рис. 7.

Из представленных на графике данных видно, что при величине критерия Рейнольдса более 4000 наблюдается расслоение полученных величин. По нашему мнению, это связано с увеличением турбулизации потока жидкости в трубке дефлегматора.

Как видно, величины коэффициентов теплоотдачи для дефлегматора, выполненного из меди, а также моделирование для латуни и алюминия дают близкие друг к другу значения. Это связано с тем, что данные

материалы имеют близкие значения коэффициентов теплопроводности, что видно из таблицы.

Как видно из приведенных графиков, при изменении охлаждающей жидкости сопоставимыми величинами коэффициентов обладает этиленгликоль при этом режим течения жидкости изменится на ламинарный.

При математической обработке экспериментальных данных по работы дефлегматора в случае использования в случае изменения диаметра трубок изготовления дефлегматора (рис. 9).

При изменении диаметров трубок, происходит смещение значений коэффициентов теплоотдачи, что связано с тем, что при увеличении диаметра трубок происходит снижение коэффициент Рейнольдса.

Уменьшение мощности нагревателей в колонне ведет к снижению расхода охлаждающей воды в дефлегматоре, что требует при конструировании дефлегматора использования медных труб малого диаметра с целью обеспечения турбулентного режима. В этой связи, применение колонн диаметром менее 80 мм, со встроенным змеевиковым дефлегматором не эффективно, так как из-за низкой тепловой нагрузки не обеспечивается требуемая температура флегмы.

Согласно данным, представленным на рис. 10, гидравлическое сопротивление дефлегматора без орошения составило не более 35 мм.вод.ст. С увеличением нагрузки по жидкости и газу, сопротивление дефлегматора возрастает. В процессе ректификации ($N = 6$ кВт) сопротивление дефлегматора на системе этанол-вода не превышало 80 мм. вод. ст.

Как показали измерения концентрации паров смеси на входе и выходе из дефлегматора, его эффективность при капельном режиме не превысила 0,1.

Дефлегматор, представленный на рис. 3, был установлен в колонне для ректификации гидролизного этилового спирта под вакуумом на Красноярском биохимическом заводе.

Материал	Медь	Алюминий	Бронза	Железо	Латунь	Никель
Коэффициент теплопроводности	401	209,3	58	74,4	244	90,9

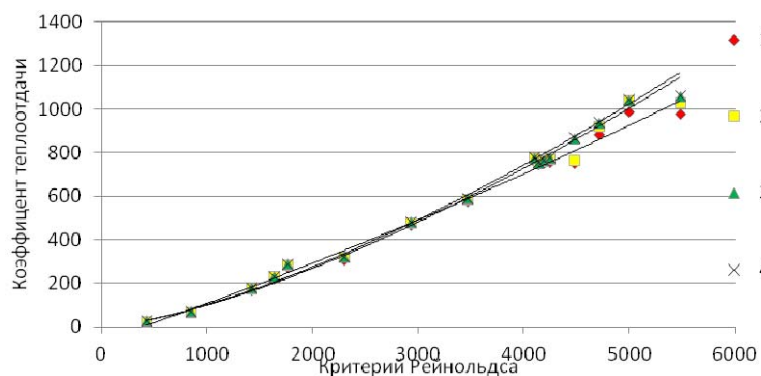


Рис. 7. Значения коэффициента теплоотдачи:
1 – никель, 2 – латунь, 3 – медь, 4 – алюминий

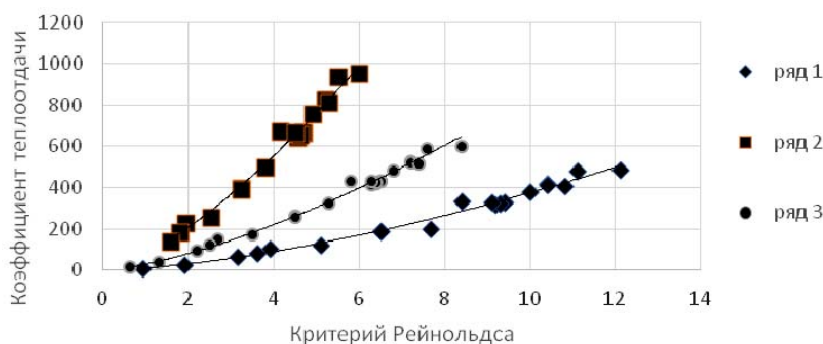


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи от критерия Рейнольдса:
1 – гексан; 2 – этиленгликоль; 3 – глицерин

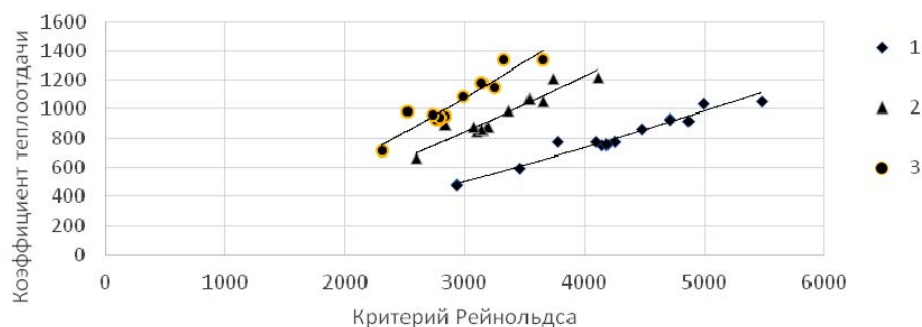


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплоотдачи от критерия Рейнольдса
изменения диаметра трубок дефлегматора:
1 – $d = 8 \cdot 1$, 2 – $d = 10 \cdot 1$, 3 – $d = 12 \cdot 1,5$

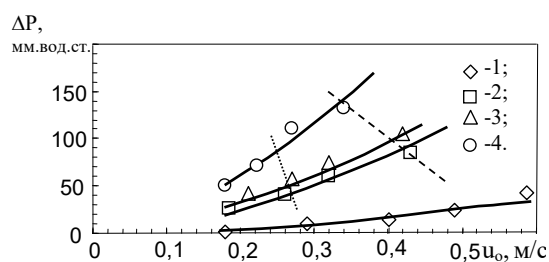


Рис. 10. Зависимость сопротивления дефлегматора от скорости газа по сечению дефлегматора:
 $D_0 = 120$ мм; $\delta_0 = 1,5$ мм, $d = 8$ мм, количество спиралей – 5 шт, витков – 8 шт. Экспериментальные точки (1–4):
1 – сухая; 2 – расход жидкости $0,012$ м³/ч; 3 – $0,014$; 4 – $0,056$. Пунктирная линия – начало захлебывания.
Линии из точек начало провального режима

При очистке технического этилового спирта ректификованного в вихревой спиртовой колонне со встроенным дефлегматором, выполненным из спиралей Архимеда, получено снижение концентрации примесей в дистилляте (альдегидов, сложных эфиров) в 1,6 раза, по сравнению с использованием традиционного дефлегматора, выполненного из кожухотрубчатого теплообменника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химических технологий. М. : Химия, 1973. 750 с.
2. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи / И. В. Доманский [и др.]. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1982. 384 с.
3. Математическое моделирование работы встроенного теплообменника в зависимости от геометрического исполнения / Е. О. Материкина [и др.] // Энергетика в современном мире. 2019. С. 131–136.
4. Математическое моделирование работы встроенного теплообменника при разных материалах исполнения / А. В. Снегирева [и др.] // Энергетика в современном мире. 2019. С. 136–140.
5. Кустов А. В. Гидродинамика и массообмен на вихревых ректификационных ступенях при переработки растительного сырья : дис. ... канд. техн. наук ; 05.21.03. Красноярск : СибГТУ, 2010.
6. Баяндина М. М., Кустов А. В. Исследование коэффициента теплопередачи встроенного теплообменника ректификационной колонны // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. 2023. С. 188–193.
7. Влияние на коэффициенты теплоотдачи материала встроенного дефлегматора / А. В. Снегирева [и др.] // Инноватика-2020. 2020. С. 57–60.
8. Влияние диаметра трубок встроенного дефлегматора на коэффициенты теплоотдачи / Е. О. Материкина [и др.] // Инноватика-2020. 2020. С. 53–56.
9. Баяндина М. М. Определение коэффициентов теплоотдачи для встроенного дефлегматора ректификационной колонны // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2023. С. 271–273.
10. Математическое моделирование работы встроенного дефлегматора / А. В. Кустов [и др.] // Решетневские чтения. 2020. С. 176–177.

11. Изучения встроенного дефлегматора в насадочной колонне [текст] / Н. А. Войнов [и др.] // Химическая промышленность сегодня. 2010. № 3. С. 52–56.

REFERENCES

1. Kasatkin A. G. Basic processes and apparatus of chemical technologies. M. : Chemistry, 1973. 750 p.
2. Machines and apparatus for chemical production: Examples and tasks / I. V. Domansky [and others]. L. : Mechanical Engineering, Leningrad. Department, 1982. 384 p.
3. Mathematical modeling of the operation of a built-in heat exchanger depending on the geometric design / E. O. Materikina [et al.] // Energy in the modern world. 2019. Pp. 131–136
4. Mathematical modeling of the operation of a built-in heat exchanger with different materials / A. V. Snegireva [et al.] // Energy in the modern world. 2019. Pp. 136–140.
5. Kustov A. V. Hydrodynamics and mass transfer in vortex distillation stages during processing of plant raw materials : dis. ... cand. tech. Sciences; 05.21.03. Krasnoyarsk : SibSTU, 2010.
6. Bayandina M. M., Kustov A. V. Study of the heat transfer coefficient of the built-in heat exchanger of a distillation column // Science and youth: problems, searches, solutions. 2023. Pp. 188–193
7. Influence on the heat transfer coefficients of the material of the built-in dephlegmator / A. V. Snegireva [et al.] // Innovatika-2020. 2020. Pp. 57–60
8. The influence of the diameter of the tubes of the built-in dephlegmator on the heat transfer coefficients. / E. O. Materikina [etc.] // Innovatika-2020. 2020. Pp. 53–56.
9. Bayandina M. M. Determination of heat transfer coefficients for the built-in reflux condenser of a distillation column // Current problems of aviation and astronautics. 2023. Pp. 271–273.
10. Mathematical modeling of the operation of the built-in reflux condenser / A. V. Kustov [et al.] // Reshetnev readings. 2020. Pp. 176–177.
11. Study of a built-in dephlegmator in a packed column [text] // N. A. Voinov [and others] // Chemical industry today. 2010. No. 3. Pp. 52–56.

© Баяндина М. М., Кустов А. В.,
Гончарова Я. С., 2024

Поступила в редакцию 01.11.2023
Принята к печати 22.01.2024