

УДК 66.015.23

## НАСАДОЧНАЯ ТАРЕЛКА ПЕРЕКРЕСТНОГО ТОКА ДЛЯ ДИАБАТИЧЕСКОЙ УКРЕПЛЯЮЩЕЙ КОЛОННЫ

© *Н.А. Войнов\*, А.В. Богаткова, Д.А. Земцов, О.П. Жукова, В.А. Чернов*

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037, Россия, n.a.voinov@mail.ru*

Диабатическая ректификация является одним из способов повышения энергоэффективности процесса разделения смесей в лесохимической промышленности. Эффективными показали себя диабатические установки, в которых осуществлялась парциальная конденсация поднимающихся паров и дальнейшее испарение конденсата на контактных устройствах, размещенных на тарелках. Перспективными в этом плане являются устройства, выполненные из горизонтально установленных перфорированных пластин. Они обладают низким сопротивлением и высокой эффективностью, однако имеют узкий диапазон работы. Для интенсификации процесса разделения и увеличения производительности колонны разработана и исследована комбинированная насадочная тарелка перекрестного тока. Она включает спирально-призматическую насадку, размещенную в коаксиальных перфорированных стаканах, и профилированные пластины, обеспечивающие последовательное стекание флегмы и предотвращение попадания конденсата в зону испарения. Такое исполнение тарелки позволило интенсифицировать процесс тепломассообмена как в паровой, так и в жидкой фазе, расширить рабочий диапазон устойчивой работы тарелки.

Представлены результаты экспериментального исследования разработанной тарелки в опытной ректификационной колонне. Показано распределение концентрации этанола в жидкости, стекающей по пластинам. Установлена полезная разность температур, при которой происходит испарение флегмы на профилированных пластинах и конденсация под пластинами. Определена величина коэффициента теплопередачи теплового потока на пластине. Проведено сравнение характерных показателей насадочной адиабатической колонны со спирально-призматической насадкой противоточного типа с диабатической колонной с тарелками перекрестного тока и показано преимущество последней. Разработанные тарелки рекомендуется применять при создании малотоннажных укрепляющих колонн, в том числе и под вакуумом.

*Ключевые слова:* диабатическая ректификация, тарелка, насадка, испарение, конденсация, эффективность, коэффициент теплопередачи.

---

**Для цитирования:** Войнов Н.А., Богаткова А.В., Земцов Д.А., Жукова О.П., Чернов В.А. Насадочная тарелка перекрестного тока для диабатической укрепляющей колонны // Химия растительного сырья. 2024. №4. С. 405–415. DOI: 10.14258/jcprm.20240414048.

---

### **Введение**

Ректификация широко применяется в промышленных технологиях переработки растительного сырья. Используемые при ректификации смеси, в основном многокомпонентные, трудноразделяемые, подвергаются термическому распаду при длительном воздействии температуры и деструкции. Протекающие при этом химические процессы оказывают отрицательное влияние на выход и качество продукта, что требует разработки новых подходов к проведению процесса ректификации, совершенствования контактных устройств и установок.

В лесохимической промышленности ректификация используется при получении продуктов с высокой добавленной стоимостью, фитостероинов, жирных спиртов, жирных и смоляных кислот из таллового пека [1], а также для очистки и регенерации растворителей и экстрагентов, этилового спирта [2]. Например, для очистки сульфатного скипидара от сернистых соединений с наибольшим выходом очищенного скипидара с массовой долей серы менее 50 ppm, а также получения безводного этанола востребованы малотоннажные вакуумные установки с высокой эффективностью, малой удерживающей способностью по жидкости, низким гидравлическим сопротивлением и высокой энергоэффективностью [3].

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

В настоящее время разработаны различные методы экономии энергии и снижения капитальных затрат [4–6], включая адиабатическую ректификацию с использованием новых контактных устройств [7–13].

Например, замена адиабатической ректификационной установки на адиабатическую позволила снизить затраты на процесс разделения [14], использовать более дешевые теплоносители и теплообменные устройства [15–18].

Одним из перспективных путей интенсификации адиабатической ректификации является применение установок, в которых флегма создается непосредственно на тарелках, путем осуществления парциальной конденсации поднимающихся паров на поверхности встроенных дефлегматоров [19–21]. Дальнейшим совершенствованием колонн адиабатической ректификации явилось осуществление частичного испарения полученного конденсата на поверхности профилированных пластин до ввода его в основной поток флегмы [22]. Это позволило снизить перепад давления в колонне, ее высоту и металлоемкость, поверхность теплообмена дефлегматоров, расход теплоносителя и пара [13, 22].

Наличие флегмы, образованной на поверхности пластин, обеспечивало ее частичное испарение и частичную конденсацию поднимающихся паров под пластинами, что привело к укреплению паров и снижению сопротивления массопереносу в паровой фазе.

Адиабатическая колонна с тарелками из профилированных пластин имеет низкое сопротивление. Однако вследствие подвода флегмы на каждую тарелку эффективно работает в узком диапазоне нагрузок по пару. При увеличении производительности установки возрастает расход флегмы и, следовательно, плотность орошения пластины, что приводит к снижению эффективности и работоспособности колонны в целом. Другим недостатком такой тарелки является низкая интенсивность истощения легколетучего компонента из потока флегмы, стекающей по колонне, что ограничивает ее применение.

Для устранения указанных недостатков разработана тарелка, которая включает профилированные пластины (рис. 1) и насадку перекрестного тока [23–25]. При таком конструктивном исполнении флегма, образованная при частичной конденсации поднимающихся паров в дефлегматоре, подается на поверхность только верхней пластины и последовательно стекает по ниже размещенным пластинам, а конденсат, образованный на поверхности пластин, не смешивается со стекающей флегмой, что обеспечивает укрепление поднимающихся паров [22]. Насадка интенсифицирует истощение легколетучего компонента из потока флегмы колонны. Такое конструктивное решение позволяет расширить диапазон устойчивой работы колонны и повысить ее эффективность.

Цель работы – исследование параметров разработанной тарелки применительно к укрепляющей адиабатической колонне.

### *Экспериментальная часть*

Общий вид разработанной насадочной тарелки представлен на рисунке 1. Она состоит из шести горизонтально установленных отбортованных профилированных пластин, трех верхних и трех нижних. Верхние пластины (рис. 1в) предназначены для частичного испарения флегмы тарелки. Нижние пластины (рис. 1г) – для отвода конденсата, образованного при конденсации паров на поверхности под пластинами. На пластинах выполнены отбортованные отверстия диаметром 18 мм для прохода пара. Верхние пластины снабжены кольцевыми каналами со щелями для последовательного перетекания флегмы. Нижние пластины для отвода конденсата (рис. 1г) смещены относительно верхних пластин с целью устранения попадания флегмы на их поверхность [26].

Опытная колонна, на которой проводились исследования, представлена на рисунке 2. Она включает тарелку, состоящую из верхних пластин 2, 4, 6 и нижних пластин 1, 3, 5. Тарелка снабжена дефлегматором – змеевиком 7, выполненным из медной трубки диаметром 8 мм с поверхностью  $0.012 \text{ м}^2$ , и имеет горизонтальную перегородку 8 с отверстиями 9, под которой в коаксиально установленных перфорированных стаканах размещалась насадка перекрестного тока 10. Тарелка установлена в корпусе 12, выполненном из царг диаметром 0.2 м. В верхней части колонны установлен дефлегматор колонны 13 поверхностью  $0.036 \text{ м}^2$ , распределитель флегмы 14 и тарелка для стабилизации температуры 15. Установка снабжена конденсатором 16, смотровым окном 17, ротаметрами 18 марки РС-5 и системой штуцеров для отбора проб в паровой и жидкой фазах. В кубе колонны 11 установлены электронагреватели 19 мощностью 15 кВт.

Исследовались разные конструктивные варианты разработанной тарелки, схема потоков на которых представлена на рисунке 3.



Рис. 1. Общий вид насадочной тарелки перекрестного тока (а), спирально-призматической насадки (б), верхней профилированной пластины (в) и нижней пластины для отвода конденсата (г)

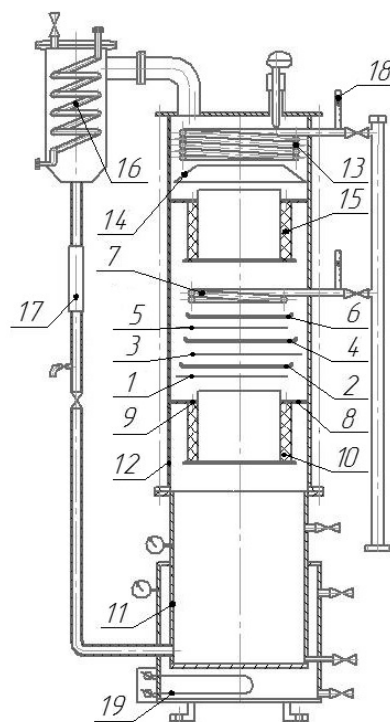


Рис. 2. Схема экспериментальной колонны: 1, 3, 5 – нижние пластины для конденсата; 2, 4, 6 – верхние пластины для флегмы; 7 – дефлегматор тарелки; 8 – горизонтальная перегородка; 9 – отверстия для стекания жидкости на поверхность насадки; 10 – насадка, 11 – куб, 12 – корпус, 13 – дефлегматор колонны, 14 – распределитель; 15 – стабилизационная тарелка, 16 – конденсатор, 17 – смотровое окно, 18 – ротаметры, 19 – электронагреватели

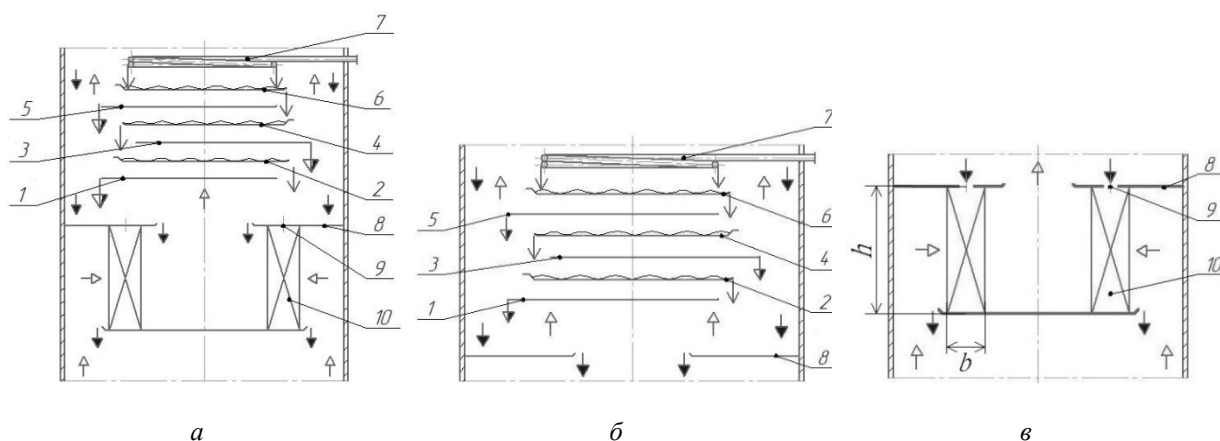


Рис. 3. Схемы потоков на тарелке (а), на тарелке, выполненной из пластин (б), на насадочной тарелке (в),  $\rightarrow$  – флегма колонны;  $\rightarrow$  – пары;  $\rightarrow$  – конденсат;  $\rightarrow$  – флегма тарелки. Позиции согласно рисунку 2

Пары, поднимающиеся из куба колонны, согласно схеме потоков (рис. 3а), частично конденсировались на поверхности дефлегматора 7 с образованием флегмы тарелки. Другая часть паров конденсировалась на поверхности дефлегматора 13 (рис. 2), с образованием флегмы колонны, которая стекала на горизонтальную перегородку 8. Оставшаяся часть паров конденсировалась в конденсаторе колонны и поступала в куб. Флегма тарелки, образованная на поверхности дефлегматора 7, стекала на поверхность верхней профилированной пластины 6, образуя на ней тонкий слой жидкости. Затем, через щели кольцевого канала, последовательно стекала на расположенные ниже верхние пластины и поступала на горизонтальную перегородку тарелки, смешиваясь с флегмой колонны. Далее жидкость через отверстия 9, выполненные на горизонтальной перегородке 8, поступала на поверхность насадки 10, где осуществлялся контакт с поднимающимися парами. Флегма на поверхности пластин 2, 4, 6 частично испарялась за счет тепла конденсации пара. Образующийся конденсат стекал на пластины для отвода конденсата 1, 3, 5, а оттуда поступал в поток флегмы колонны. Таким образом, на тарелке происходило испарение жидкости на поверхности верхних пластин, конденсация поднимающихся паров под нижними пластинами, а также тепломассообмен на насадке 10.

При осуществлении адиабатической ректификации теплоноситель (вода) в дефлегматор тарелки 7 не подавался.

Исследования в колонне проводились на системах воздух – вода и смеси этанол – вода.

Удельный расход газа (пара) через насадку рассчитывался по зависимости:

$$q = Q_v / (\pi \cdot d \cdot h), \quad (1)$$

где  $Q_v$  – расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $d$  – диаметр наружного перфорированного стакана для удержания насадки,  $\text{м}$ ;  $h$  – высота слоя насадки,  $\text{м}$ .

Эффективность тарелки при осуществлении абсорбции рассчитывалась по зависимости:

$$E_x = (c - c_0) / (c^* - c_0), \quad (2)$$

где  $c$  – концентрация кислорода в жидкости на тарелке,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_0$  – начальная концентрация кислорода в жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c^*$  – равновесная концентрация кислорода в жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Начальная концентрация кислорода в воде подаваемого на насадку перекрестного тока при абсорбции составляла  $0.1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$ . Концентрация кислорода в воде определялась датчиком полярографического типа. Расход воды с пониженным содержанием кислорода варьировался от 0.1 до 0.5  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

При ректификации начальная концентрация этанола в смеси в кубе составила 2–60% масс. Концентрация этанола измерялась в паровой и жидкой фазах. Состав этилового спирта определялся рефрактометром марки LR-3, его тарировка осуществлялась с использованием газового хроматографа Agilent 7890a с ПИД детектором.

Расход пара и жидкости по колонне рассчитывался исходя из материального и теплового балансов.

Эффективность тарелки при ректификации смеси этанол-вода определялась по формуле:

$$E_y = (y_{ex} - y_{ent}) / (y^* - y_{ent}), \quad (3)$$

где  $y^*$  – равновесная концентрация паров с жидкостью на горизонтальной перегородке тарелки, % мольн.;  $y_{ent}$  – концентрация паров этанола на входе тарелки, % мольн.;  $y_{ex}$  – концентрация паров этанола на выходе тарелки, % мольн.

### Обсуждение результатов

Согласно полученным данным (рис. 4а), гидравлическое сопротивление тарелки в исследуемом диапазоне расхода газа 10–70 м<sup>3</sup>/час не превысило 400 Па, что существенно ниже в сравнении с насадочной противоточной колонной [27]. Зависимость коэффициента сопротивления сухой насадки (рис. 4б) от удельного расхода газа имеет вид  $\xi = 108 \cdot q^{-0.95}$ . Наблюдалось два режима взаимодействия газа с жидкостью, область слабых и сильных взаимодействий, которые разграничиваются на рисунке 4а, штрихпунктирной линией.

Исследовалась эффективность трех конструктивных вариантов исполнения тарелки, схемы потоков на которых представлены на рисунке 5.

Значения эффективности тарелки, на которой установлены только пластины, без насадки (рис. 3б) представлены на рисунке 5а. Согласно полученным данным, эффективность тарелки возрастает с увеличением концентрации этанола в разделяемой смеси и составила наибольшую величину при высоких концентрациях этанола в жидкости. Когда, согласно [28], основное сопротивление массопереносу сосредоточено в паровой фазе.

Наибольшая эффективность достигнута при установке на тарелке трех верхних пластин (рис. 5а, точки 1), а наименьшая – при одной верхней пластине (рис. 5а, точки 2).

Изменение концентрации этанола в флегме, стекающей по пластинам 2, 4, 6, и в конденсате на пластинах 1, 3, 5 представлено на рисунке 5б.

Снижение концентрации этанола в стекающей флегме, образованной на тарелке, обусловлено испарением смеси, а снижение концентрации этанола в конденсате на нижних пластинах вызвано эффектом парциальной ректификации. Расход испарившейся смеси в диапазоне теплового потока дефлегматора 500–3000 Вт на пластине 6 составил  $(0.3–0.5) \cdot 10^{-3}$  кг/с, а на пластине 2 –  $(0.1–0.2) \cdot 10^{-3}$  кг/с. Снижение расхода испарившихся паров вызвано уменьшением полезной разности температур между температурой паров под пластиной и температурой кипения жидкости на пластине. Как установлено, кипение флегмы на поверхности верхних пластин, а, следовательно, и интенсивное испарение происходило при полезной разности температур 7–15 °С. Полученные данные позволяют оценить необходимое количество пластин на тарелке.

Величина коэффициента теплопередачи дефлегматора 7, в диапазоне числа Рейнольдса воды 3000–8000 составила 2000–3500 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Величина коэффициента теплопередачи (при кипении и конденсации) на верхних пластинах в интервале расхода флегмы на тарелке 0.0001–0.0004 кг/с составила 1500–3600 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Результаты исследования эффективности тарелки, на которой размещена только насадка (рис. 3в), без подачи теплоносителя в дефлегматор 7 представлена на рисунке 6.

Как установлено, с увеличением расхода пара и высоты слоя насадки эффективность тарелки возрастает. При сравнительно высокой концентрации этанола в жидкости, когда сопротивление массопереносу сосредоточено в паровой фазе, эффективность такой тарелки составила 0.4–0.5 (рис. 6б). При низкой концентрации этанола в жидкости эффективность тарелки достигает 0.75. Таким образом, насадка, размещенная на тарелке перекрестного тока, преимущественно снижает сопротивление массопереносу в жидкой фазе. Эффективность такой тарелки с насадкой при абсорбции (сопротивление массопереносу сосредоточено в жидкой фазе) представлена на рисунке 7. С увеличением расхода газа и высоты слоя насадки эффективность тарелки возрастает и достигает 0.9.

Эффективность тарелки при размещении на ней шести пластин и насадки, согласно схеме рисунка 3а, представлена на рисунке 8, она составила 0.75–0.90. На рисунке 8 пунктирной линией 2 показана эффективность тарелки только с насадкой, а линией 3 – эффективность тарелки, выполненной только из пластин. Таким образом, при высокой концентрации этанола в жидкости, когда сопротивление массопереносу в основном сосредоточено в паровой фазе, целесообразно на тарелках устанавливать профилированные

пластины. Тарелку с насадкой целесообразно использовать при низкой концентрации легколетучего компонента в жидкости.

Таким образом, разработанная комбинированная тарелка перекрестного тока позволила интенсифицировать процесс ректификации как в паровой, так и жидкой фазах.

Характерные показатели насадочной адиабатической колонны со спирально-призматической насадкой противоточного тока, исследованной в работе [27], в сравнении с данными диабатической колонны с разработанной насадочной тарелкой представлены в таблице. Конструктивные параметры колонн – диаметр 195 мм, число теоретических тарелок – 17 шт., высота слоя насадки на тарелке 100 мм, смесь – этанол – вода.

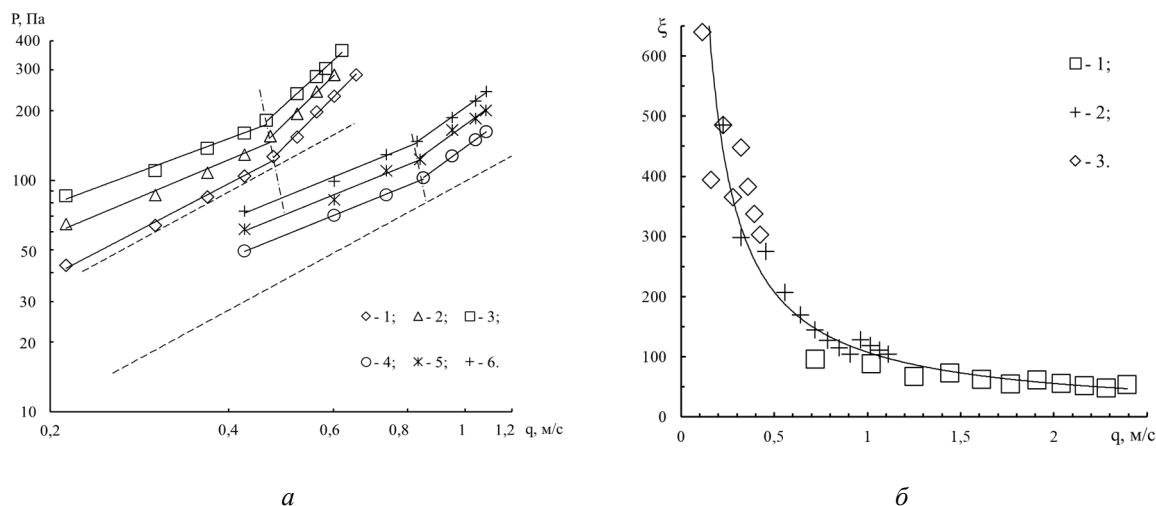


Рис. 4. Зависимость перепада давления тарелки (а) и коэффициента сопротивления сухой тарелки (б) от удельного расхода газа при ширине насадки  $b=40$  мм: а) Экспериментальные точки для слоя насадки  $h=90$  мм (1–3): при расходе жидкости 1 –  $L=1,27 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; 2 –  $L=1,83 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; 3 –  $L=3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; (4–6)  $h=45$  мм: 4 –  $L=1,20 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; 5 –  $L=2,46 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; 6 –  $L=4,59 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с; б) Экспериментальные точки (1–3): 1 –  $h=20$  мм, 2 –  $h=45$  мм, 3 –  $h=90$  мм. Пунктирная линия – сопротивление сухой тарелки

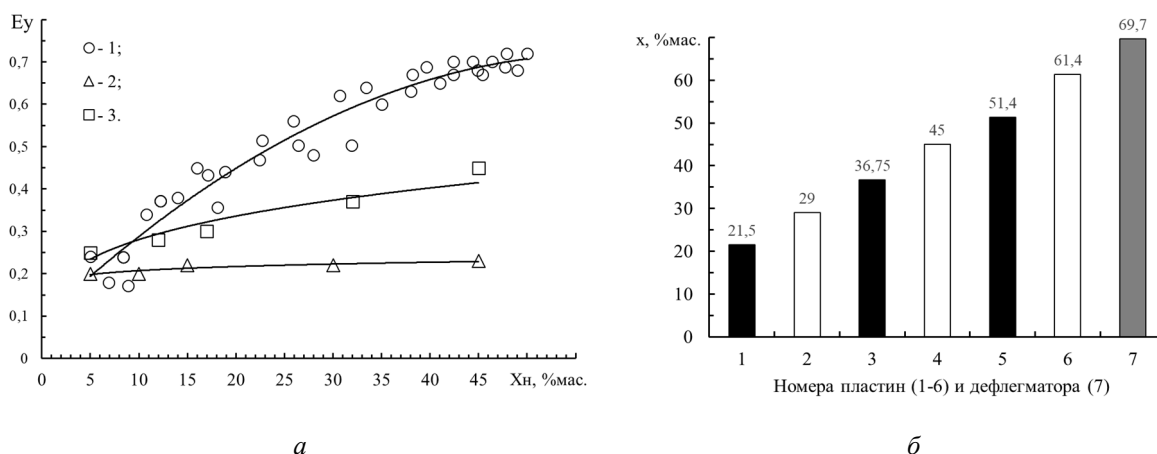


Рис. 5. Эффективность тарелки из пластин от концентрации этанола на горизонтальной перегородке (а) и распределение концентрации этанола в жидкости, стекающей по пластинам (б) при тепловом потоке куба 10 кВт и флегмовом числе  $R=3$ , тепловом потоке дефлегматора на тарелке 800 Вт; а) экспериментальные точки (1–3): 1 – три верхние пластины при диабатической ректификации, 2 – одна верхняя пластина при адиабатической ректификации, 3 – две верхние пластины при диабатической ректификации

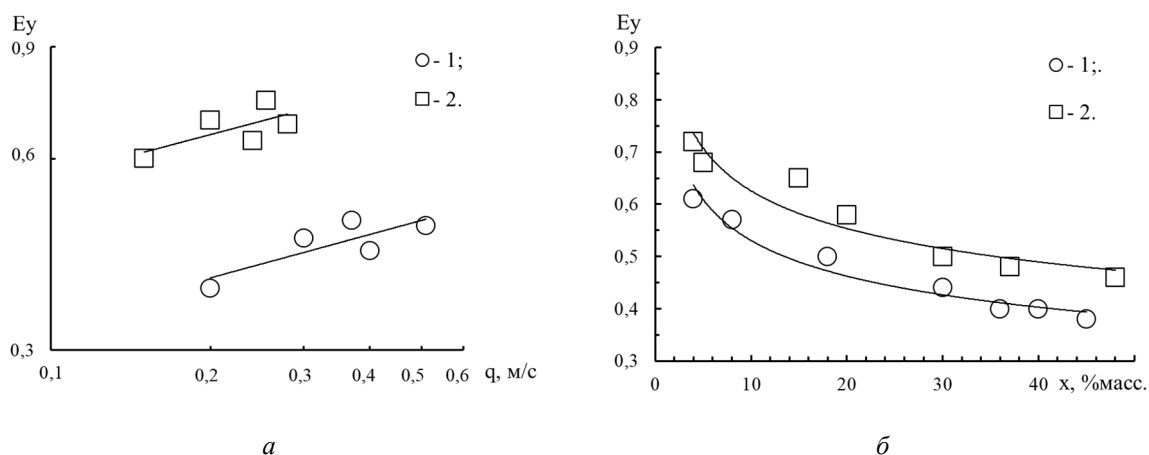


Рис. 6. Эффективность насадочной тарелки при диабатической ректификации от удельного расхода пара (а) и концентрации этанола в жидкости на горизонтальной перегородке (б) при  $R = 3$ , тепловом потоке дефлегматора на тарелке 800–1200 Вт,  $b=25$  мм и удельном расходе пара 0.2–0.5 м³/с; а) экспериментальные точки (1–2): 1 –  $h=45$  мм, 2 –  $h=90$  мм; б) экспериментальные точки при  $b=40$  мм и  $L=1.17 \cdot 10^{-5}$  м³/с: (1–2): 1 –  $h=45$  мм, 2 –  $h=90$  мм

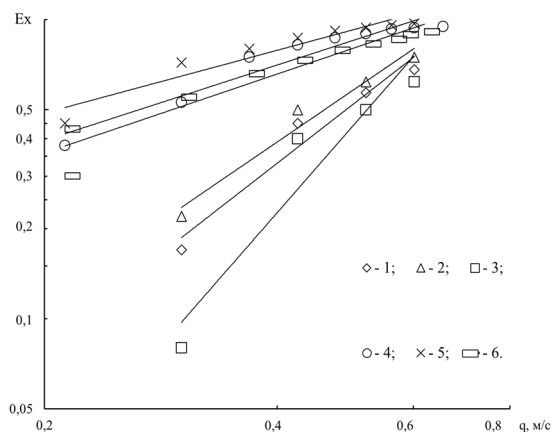


Рис. 7. Эффективность насадочной тарелки при абсорбции от удельного расхода газа: экспериментальные точки при  $h=40$  и 90 мм и расходе жидкости  $L$ : экспериментальные точки (1–3): 1 –  $10^{-5}$  м³/с; 2 –  $2.4 \cdot 10^{-5}$  м³/с; 3 –  $5 \cdot 10^{-5}$  м³/с;  $h=90$  мм (4–6): 4 –  $1.30 \cdot 10^{-5}$  м³/с; 5 –  $1.80 \cdot 10^{-5}$  м³/с; 6 –  $3 \cdot 10^{-5}$  м³/с

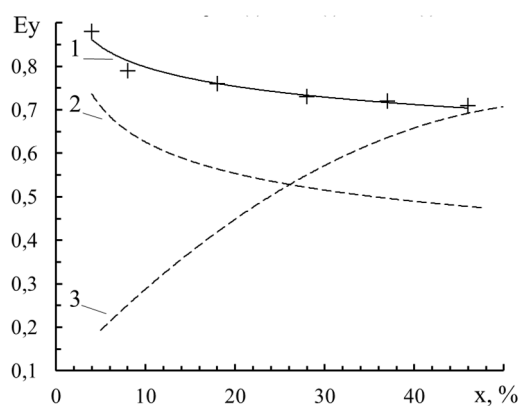


Рис. 8. Зависимость эффективности тарелки от концентрации этанола в жидкости на горизонтальной перегородке при флегмовом числе  $R=3$ , тепловом потоке дефлегматора на тарелке 800–1000 Вт, тепловом потоке куба 10 кВт: линии (1–3): 1 – тарелка с насадкой и пластинами, 2 – тарелка только из насадки, 3 – тарелка только из пластин

Сравнительные показатели насадочной адиабатической колонны со спирально-призматической насадкой противоточного тока и диабатической колонны с насадочной тарелкой перекрестного тока

Показатели	Адиабатическая колонна	Диабатическая колонна
Фактор скорости по сечению колонны, $\text{Па}^{0.5}$	0.36–0.5	0.15–0.9
Число действительных тарелок, шт.	17.0	22.0
Гидравлическое сопротивление колонны, Па	4000	2640
Эффективность	1.0	0.7
Масса насадки, кг	71.0	16.0
Объем головной фракции, л (в спирте-сырце объемом 100 л), согласно [27]	4.0	0.8

### Заключение

Размещение на тарелке насадки перекрестного тока снижает сопротивление массопереносу в жидкой фазе, а размещение профилированных пластин, напротив, интенсифицирует массоперенос в паровой фазе. Комбинированная насадочная тарелка перекрестного тока позволила интенсифицировать процесс в обеих фазах и достигнуть эффективности 0.75–0.95.

Величина коэффициента теплопередачи при испарении флегмы на профилированных пластинах составила 1500–3600 Вт/м<sup>2</sup>·К. Одним из условий испарения флегмы на тарелке является обеспечение полезной разности температур в интервале 7–15 °С и устранение смещения конденсата, образованного на поверхности пластин, с флегмой, полученной на тарелке.

Применение насадочных тарелок перекрестного тока, снабженных профилированными пластинами и насадкой, при реализации диабатической ректификации имеет преимущество перед насадочной противоточной колонной, вследствие снижения гидравлического сопротивления в 1.5 раза, уменьшения массы насадки в 4.4 раза и снижения потерь этанола при отборе головной фракции.

### Финансирование

*Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.*

### Конфликт интересов

*Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.*

### Открытый доступ

*Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.*

### Список литературы

1. Исмагилов Р.М., Радбиль А.Б., Радбиль Б.А. Пути квалифицированного использования таллового пека // Химия растительного сырья. 2004. №2. С. 73–76.
2. Patent 20100137556 (US). Process for isolation of fatty acids, resin acids and sterols from tall oil pitch / A. Hamunen. – 03.06.2010.
3. Kiss A.A. Distillation technology – still young and full of breakthrough opportunities // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2013. Vol. 89(4). Pp. 479–498. <https://doi.org/10.1002/jctb.4262>.
4. Parhi S.S., Rangaiah G.P., Jana A.K. A novel vapor recompressed batch extractive distillation: Design and retrofitting // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 260. 118225. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118225>.
5. Javed A., Hassan A., Babar M., Azhar U., Riaz A., Mujahid R., Ahmad T., Mu-bashir M., Lim H.R., Show P.L., Khoo K.S. A Comparison of the Exergy Efficiencies of Various Heat-Integrated Distillation Columns // Energies. 2022. Vol. 15, no. 18. 6498. <https://doi.org/10.3390/en15186498>.
6. Duan C., Li C. Energy-saving improvement of heat integration for separating dilute azeotropic components in extractive distillation // Energy. 2023. Vol. 263C. 125821. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125821>.
7. Ray S., Das G. Column and Column Internals for Gas-Liquid and Vapour-Liquid Contacting // Process Equipment and Plant Design. 2020. Pp. 427–523. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814885-3.00014-2>.
8. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Meski G., Houghton P. Overview of Methods to Control the Liquid Distribution in Distillation Columns with Structured Packing: Improving Separation Efficiency // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 132. 110092. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110092>.
9. Zakharov M.K., Boichuk A.A. Influence of Internal Energy Saving on Selection of Optimum Scheme of Heating for Mixture Separation in Fractionating Column // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 54. Pp. 901–909. <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00570-4>.
10. Marin-Gallego M., Mizzi B., Rouzineau D., Gourdon C., Meyer M. Concentric Heat Integrated Distillation Column (HIDiC): a New Specific Packing Design, Characterization and Pre-Industrial Pilot Unit Validation // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2022. Vol. 171. 108643. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108643>.
11. Madyshev I.N., Kharkov V.V., Dmitrieva O.S., Zinurov V.E. Energy saving in distillation by combining vortex contact device and thermal effects // Thermal Science and Engineering Progress. 2022. Vol. 34. 101431. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101431>.
12. Kooijman H.A., Sorensen E. Recent Advances and Future Perspectives on More Sustainable and Energy Efficient Distillation Processes // Chemical Engineering Research and Design. 2022. Vol. 188. Pp. 473–482. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.005>.



13. Voinov N.A., Bogatkova A.V., Zemtsov D.A. Intensification of Heat and Mass Transfer in a Diabatic Column with Vortex Trays // ChemEngineering. 2022. Vol. 6, no. 2. P. 29. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020029>.
14. Mello G.N., Battisti R., Urruth N.S., Machado R.A.F., Marangoni C. New Distributed-Action Control Strategy with Simultaneous Heating and Cooling in Trays of a Pilot-Scale Diabatic Distillation Column // Chemical Engineering Research and Design. 2020. Vol. 159. Pp. 424–438. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2020.05.001>.
15. Fonyo Z., Benko N. Comparison of Various Heat Pump Assisted Distillation Configurations // Chemical Engineering Research and Design. 1998. Vol. 76. Pp. 348–360. <https://doi.org/10.1205/026387698524776>.
16. Battisti R., Machado R.A.F., Marangoni C. A Background Review on Falling film Distillation in Wetted-Wall Columns: From Fundamentals Towards Intensified Technologies // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2020. Vol. 150. 107873. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107873>.
17. Biasi L.C.K., Batista F.R.M., Zemp R.J., Romano A.L.R., Heinkenschloss M., Meirelles A.J.A. Parastillation and Metastillation Applied to Bioethanol and Neutral Alcohol Purification with Energy Savings // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2021. Vol. 162. 108334. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108334>.
18. Alves J.L.F., da Silva Filho V.F., Machado R.A.F., Marangoni C. Ethanol Enrichment from an Aqueous Stream using an Innovative Multi-Tube Falling Film Distillation Column Equipped with a Biphasic Thermosiphon // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 139. Pp. 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.039>.
19. Madyshev I.N., Kharkov V.V., Dmitrieva O.S., Zinurov V.E. Distillation by Combining Vortex Contact Device and Thermal Effects // Thermal Science and Engineering Progress. 2022. Vol. 34. 101431. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101431>.
20. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Mayasova A.O., Nikolaev A.N. Increasing Efficiency of Contact Devices of Column Mass-Transfer Apparatuses When Using Thermal Fractionation Processes // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, no. 3–4. Pp. 259–265. <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01084-2>.
21. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Mayasova A.O., Nikolaev A.N. Determination of Heat Flows in Built-in Column Reflux Exchangers During Diabatic Rectification // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58. Pp. 537–544. <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01126-3>.
22. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Deryagina N.V., Bogatkova A.V., Zhukova O.P. A Study of Diabatic Distillation in a Column with a Low Pressure Drop // Chemical Engineering Research and Design. 2022. Vol. 185. Pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.06.033>.
23. Патент №2607730С1 (РФ). Массообменная колонна с перекрестным током жидкой и газовой (паровой) фаз системы «ПЕТОН» / И.А. Мнушкин. – 2017.
24. Peton – технологический инжиниринговый холдинг. [Электронный ресурс]. URL: <https://oldsite.peton.ru/pages.php?p=189>.
25. Марешова Л.А., Богатых К.Ф., Рольник Л.З., Ягафарова Г.Г. Результаты внедрения в промышленность разработок по регулярным перекрестноточным насадкам // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2007. №1. С. 74–85.
26. Патент №2803963 (РФ). Контактная ступень колонны термической ректификации / Н.А. Войнов, Д.А. Земцов. – 2023.
27. Войнов А.Н., Жукова О.П., Паньков В.А., Войнов Н.А. Ректификация этилового спирта в колоннах со спирально-призматической насадкой // Техника и технология пищевых производств. 2012. №4. С. 95–99.
28. Шагивалиев А.А., Николаев Н.А. Ректификация смеси этанол-вода в аппарате с пямотно-вихревыми контактными устройствами // Хранение и переработка сельхозсырья. 2001. №7. С. 14–17.

*Поступила в редакцию 17 ноября 2023 г.*

*После переработки 6 сентября 2024 г.*

*Принята к публикации 28 октября 2024 г.*

Voinov N.A.\*, Bogatkova A.V., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Chernov V.A. CROSS-CURRENT PACKED TRAY FOR A DIABATIC PRODUCT-CONCENTRATING COLUMN

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochy ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia, n.a.voinov@mail.ru

Diabatic rectification is one of the ways to increase the energy efficiency of the mixed distillation process. Diabatic units in which partial condensation of rising vapours and further evaporation of the condensate on contact devices placed on trays have proved effective. Horizontal perforated plate units are promising in this respect. They have low resistance and high efficiency, but have a narrow operating range. To intensify the separation process and increase column productivity, a combined cross-flow packed tray was developed and investigated. It consists of a spiral-prismatic packing placed in coaxial perforated cups and profiled plates, allowing the slurry to flow continuously downwards and preventing condensate from entering the evaporation zone. This type of tray design has made it possible to intensify the process of heat and mass transfer in the vapour and liquid phases and to extend the operating range of the tray.

The results of the experimental study of the developed tray in a pilot rectification column are presented. The distribution of the concentration of ethanol in the liquid flowing down the plates is shown. The effective temperature difference for mist evaporation on the profiled plates and condensation under the plates is determined. The value of the heat transfer coefficient of the heat flow on the plate is determined. Comparison of characteristic parameters of adiabatic column with spiral-prismatic packed countercurrent type with a diabatic column with cross-flow trays is made and the advantage of the latter is shown. For the construction of low tonnage product concentrating columns, also under vacuum, the developed trays are recommended.

**Keywords:** diabatic rectification, tray, packing, evaporation, condensation, efficiency, heat transfer coefficient.

**For citing:** Voinov N.A., Bogatkova A.V., Zemtsov D.A., Zhukova O.P., Chernov V.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 4, pp. 405–415. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240414048.

## References

1. Ismagilov R.M., Radbil' A.B., Radbil' B.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2004, no. 2, pp. 73–76. (in Russ.).
2. Patent 20100137556 (US). 03.06.2010.
3. Kiss A.A. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2013, vol. 89(4), pp. 479–498. <https://doi.org/10.1002/jctb.4262>.
4. Parhi S.S., Rangaiah G.P., Jana A.K. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 260, 118225. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118225>.
5. Javed A., Hassan A., Babar M., Azhar U., Riaz A., Mujahid R., Ahmad T., Mu-bashir M., Lim H.R., Show P.L., Khoo K.S. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 18, 6498. <https://doi.org/10.3390/en15186498>.
6. Duan C., Li C. *Energy*, 2023, vol. 263C, 125821. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125821>.
7. Ray S., Das G. *Process Equipment and Plant Design*, 2020, pp. 427–523. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814885-3.00014-2>.
8. Pavlenko A.N., Pecherkin N.I., Zhukov V.E., Meski G., Houghton P. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 132, 110092. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110092>.
9. Zakharov M.K., Boichuk A.A. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 54, pp. 901–909. <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00570-4>.
10. Marin-Gallego M., Mizzi B., Rouzineau D., Gourdon C., Meyer M. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2022, vol. 171, 108643. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108643>.
11. Madyshev I.N., Kharkov V.V., Dmitrieva O.S., Zinurov V.E. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, vol. 34, 101431. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101431>.
12. Kooijman H.A., Sorensen E. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 188, pp. 473–482. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.10.005>.
13. Voinov N.A., Bogatkova A.V., Zemtsov D.A. *ChemEngineering*, 2022, vol. 6, no. 2, p. 29. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020029>.
14. Mello G.N., Battisti R., Urruth N.S., Machado R.A.F., Marangoni C. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, vol. 159, pp. 424–438. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2020.05.001>.
15. Fonyo Z., Benko N. *Chemical Engineering Research and Design*, 1998, vol. 76, pp. 348–360. <https://doi.org/10.1205/026387698524776>.
16. Battisti R., Machado R.A.F., Marangoni C. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2020, vol. 150, 107873. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107873>.
17. Biasi L.C.K., Batista F.R.M., Zemp R.J., Romano A.L.R., Heinkenschloss M., Meirelles A.J.A. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2021, vol. 162, 108334. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108334>.
18. Alves J.L.F., da Silva Filho V.F., Machado R.A.F., Marangoni C. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, vol. 139, pp. 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.039>.
19. Madyshev I.N., Kharkov V.V., Dmitrieva O.S., Zinurov V.E. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, vol. 34, 101431. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101431>.
20. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Mayasova A.O., Nikolaev A.N. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2022, vol. 58, no. 3–4, pp. 259–265. <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01084-2>.

\* Corresponding author.

21. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Mayasova A.O., Nikolaev A.N. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2022, vol. 58, pp. 537–544. <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01126-3>
22. Voinov N.A., Zemtsov D.A., Deryagina N.V., Bogatkova A.V., Zhukova O.P. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 185, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.06.033>.
23. Patent 2607730C1 (RU). 2017. (in Russ.).
24. *Peton – tekhnologicheskii inzhiniringovyy kholding*. [Peton – a technology engineering holding]. URL: <https://old-site.peton.ru/pages.php?p=189>. (in Russ.).
25. Mareshova L.A., Bogatykh K.F., Rol'nik L.Z., Yagafarova G.G. *Elektronnyy Nauchnyy Zhurnal Neftegazovoye delo*, 2007, no. 1, pp. 74–85. (in Russ.).
26. Patent 2803963 (RU). 2023. (in Russ.).
27. Voynov A.N., Zhukova O.P., Pan'kov V.A., Voynov N.A. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh produktov*, 2012, no. 4, pp. 95–99. (in Russ.).
28. Shagivaliyev A.A., Nikolayev N.A. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya*, 2001, no. 7, pp. 14–17. (in Russ.).

Received November 17, 2023

Revised September 6, 2024

Accepted October 28, 2024

#### Сведения об авторах

Войнов Николай Александрович – доктор технических наук, профессор, n.a.voynov@mail.ru

Богаткова Анастасия Викторовна – кандидат технических наук, Sonchic-Sveta@yandex.ru

Земцов Денис Андреевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, denis\_zemtsov.92@mail.ru

Жукова Ольга Петровна – кандидат технических наук, доцент, zhukovolga@yandex.ru

Чернов Вячеслав Андреевич – студент, 76895jk@bk.ru

#### Information about authors

Voynov Nikolay Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, n.a.voynov@mail.ru

Bogatkova Anastasia Viktorovna – Candidate of Technical Sciences, Sonchic-Sveta@yandex.ru

Zemtsov Denis Andreevich – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, denis\_zemtsov.92@mail.ru

Zhukova Olga Petrovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, zhukovolga@yandex.ru

Chernov Vyacheslav Andreevich – Student, 76895jk@bk.ru