

КОНТАКТНАЯ СТУПЕНЬ ДИАБАТИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ

В. А. Чернов, Н. Ю. Кожухова, О. П. Жукова, Н. А. Войнов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sitkova72@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования новой контактной ступени диабатической ректификационной колонны рекомендуемой для использования в лесохимической промышленности. Она имеет низкую металлоемкость, гидравлическое сопротивление, удерживающую способность в сочетании с высокой разделительной способностью. Устройство включает насадку для обеспечения перекрестного тока паров, размещенную в коаксиально установленных перфорированных стаканах, над которыми установлены теплообменное устройство и профилированные пластины для осуществления на них частичной конденсации и испарения. Исследована эффективность контактной ступени в зависимости от концентрации летучих компонентов в смеси и ее гидравлическое сопротивление. Изучена интенсивность конденсации смеси паров этанол-вода на поверхности теплообменного устройства и на поверхности горизонтально установленных пластин контактной ступени. Установлены уравнения для расчета величины коэффициентов теплоотдачи. Исследована интенсивность испарения летучих компонентов с поверхности пластин, получена зависимость, позволяющая оценить расход испарившихся паров с поверхности пластины и удельную тепловую нагрузку сконденсировавшихся паров под пластиной. Показано распределение концентрации этанола в поднимающихся парах и в конденсате по высоте контактной ступени. Достигнуто снижение металлоемкости, удерживающей способности, сопротивления и эффективности в сравнении с насадочной адиабатической противоточной колонной.

Ключевые слова: теплоотдача, испарение, диабатическая ректификация, парциальная конденсация, эффективность.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 85–92

A CONTACT TRAY FOR A DIABATIC DISTILLATION COLUMN

V. A. Chernov, N. Yu. Kozhuhova, O. P. Zhukova, N. A. Voinov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: sitkova72@mail.ru

Annotation. The results of the study of a new contact tray for a diabatic distillation column that is recommended for use in the wood chemical industry are presented. The presented tray has low metal consumption, hydraulic resistance and holding capacity combined with high separating one. The device includes a packing to provide a cross current flow of vapors located in coaxially mounted perforated cylinders, above which a heat exchanger device and profiled plates are placed to perform a partial condensation and evaporation. The efficiency of the tray is investigated with a respect to the concentration of volatile components in the mixture and its hydraulic resistance. The intensity of an ethanol-water vapor mixture condensation on the surface of a heat exchanger coil and on the surface of horizontally mounted plates of a tray has been studied. The equations for calculating the values of the heat transfer coefficients are established. The evaporation of volatile components from the surface of the plates is investigated, and dependence is obtained, that makes it possible to estimate the consumption of vapors from the surface of the plate and the specific heat load of condensed vapors under the plate. The concentrations of ethanol in rising vapors and condensate along the height of the tray is shown. A reduction of a metal consumption, holding capacity, flow resistance and efficiency has been achieved in comparison with the adiabatic countercurrent column.

Keywords: heat transfer, evaporation, diabatic distillation, partial condensation, efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

Ректификация применяется в технологиях комплексной переработки древесины, в процессах извлечения биологически активных веществ из растительного сырья; химической переработки древесины и

природных отходов газификаций. В лесохимической промышленности ректификация используется при получении таллового масла, концентрата пальмитиновой кислоты, абсолютированного этанола из отходов древесины, очистке и получении скрипидара, реге-

нерации растворителей при экстракции хвои древесины [1–3].

Перерабатываемые смеси, как правило, многокомпонентны, термически неустойчивы и подвержены очистке. Например, целлюлозно-бумажные предприятия России производят скрипидар сульфатный сырье с содержанием серы около 2 %, однако, для его широкого использования на практике допустимое содержание серы должно составлять 0,005 %. Разработанные методы очистки сульфатного скрипидара в большинстве методов [4] предусматривают на конечной стадии процесса применение вакуумной ректификации с использованием установок с низким гидравлическим сопротивлением, высокой разделяющей способностью и эффективностью.

Используемые в промышленности традиционные адиабатические ректификационные установки габаритны, потребляют большие расходы теплоносителя и не эффективны [5; 6].

На ступенях таких колонн размещены большие объемы жидкости, что приводит к потерям разделяемых веществ и снижает их безопасность. На них приходится более 40 % общего потребления энергии в технологическом производстве [7]. Это привело к разработке новых энергоэффективных технологий на основе диабатической ректификации [8–11]. Одно из таких решений предусматривает размещение теплообменных устройств непосредственно на тарелках ректификационной колонны, что позволяет снизить разницу температуры между поднимающимисяарами и жидкостью на ступени, обеспечить равномерное распределение флегмы по высоте установки, уменьшить ее габариты и металлоемкость, а также интенсифицировать процесс разделения [12].

Однако для успешного внедрения таких установок в производство и управления процессом необходимы надежные данные по расчету тепломассообмена на ступенях.

В этой связи целью работы является разработка контактной ступени для диабатической ректификационной колонны с низким гидравлическим сопротивлением, высокой эффективностью и исследование на них параметров тепломассопереноса.

Для поставленной цели представляют интерес ректификационные колонны, тарелки которых выполнены из горизонтально установленных пластин [13–15], на которых одновременно протекают направленные

процессы парциальной конденсации и испарения. Они обладают низким сопротивлением, содержат сравнительно небольшое количество жидкости на тарелке и обладают широкими возможностями для обеспечения на них высокой эффективности разделения путем варьирования тепловыми потоками [16; 17].

Разработанный авторами [18] контактный элемент такой тарелки, выполненный из профилированных медных пластин с насадкой перекрестного тока, представлен на рис. 1. Контактное устройство состоит из двух перфорированных коаксиально установленных стаканов с образованием кольцевой полости, которая заполнена насадкой и снабжена горизонтальной перегородкой с отверстиями для прохода жидкости. Над насадкой размещены профилированные верхние и нижние пластины. На верхних пластинах выполнена отбортовка для удержания тонкого слоя жидкости на них и осуществления процесса испарения и конденсации. Нижние пластины предназначены для отвода конденсата образованного под пластинами с целью устранения его попадания в конденсат, стекающий последовательно по верхним пластинам.

В задачи исследования входило определение гидравлического сопротивления контактного устройства и его эффективности, а также – теплоотдачи при конденсации поднимающихся паров на поверхности теплообменного устройства и на поверхности пластин, испарения конденсата, распределения концентрации легколетучего компонента в парах и жидкости по высоте устройства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Схема установки, на которой проводились исследования, представлена на рис. 2. Она состоит из куба 1, ректификационной колонны 2 с контактными ступенями 3, технологического трубопровода со смотровым окном 4 и конденсатора 5 со змеевиковым теплообменником 6. Установка также снабжена технологическими штуцерами для отбора проб жидкости и пара, бобышками для установки датчиков измерения температуры и давления. Контактная ступень состоит из теплообменника 7, верхних пластин 8 и нижних пластин 9, горизонтальной перегородки 10 с отверстиями для прохода жидкости 11 под которыми установлены коаксиальные перфорированные стаканы 12, заполненные насадкой 13.

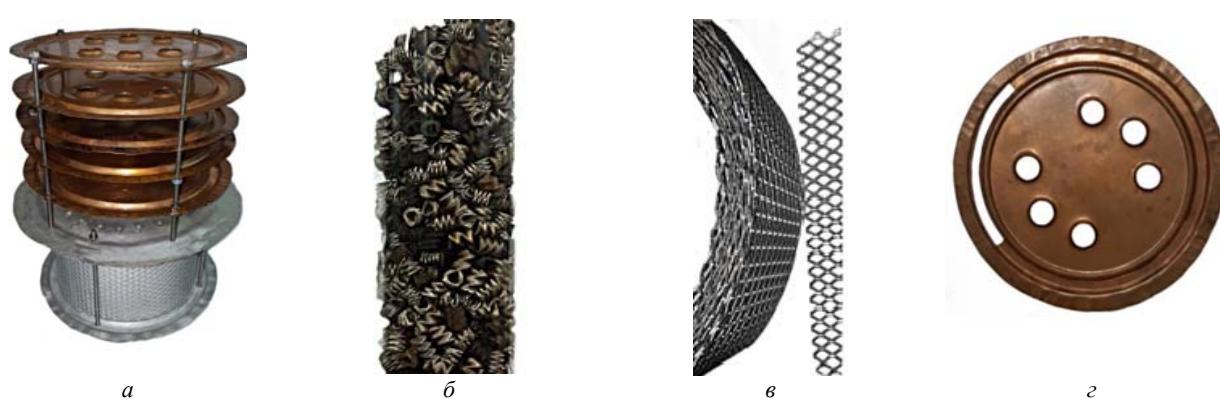


Рис. 1. Общий вид контактного устройства (а), насадки (б, в), пластины (г)

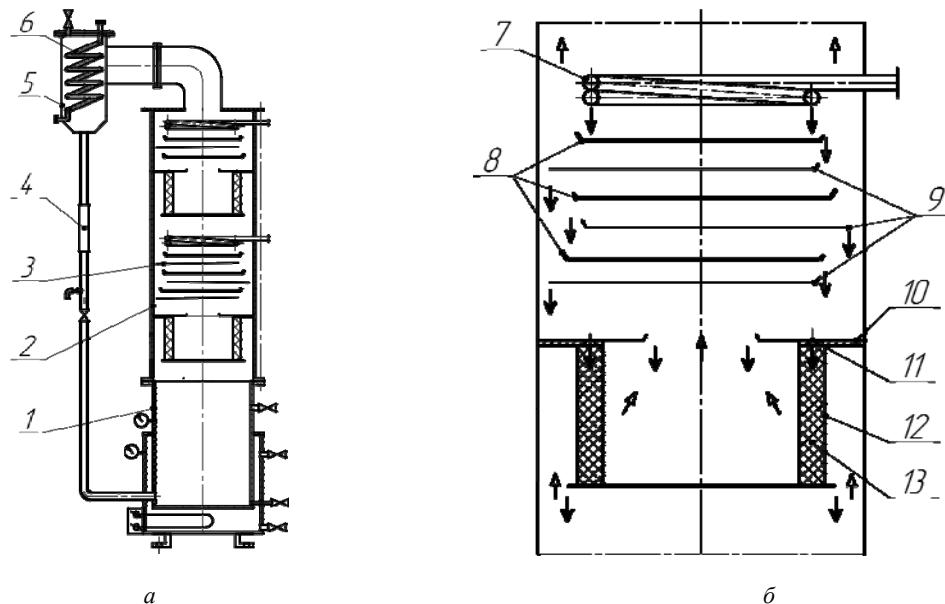


Рис. 2. Схема экспериментальной колонны (а) и контактной ступени (б):

1 – куб; 2 – ректификационная колонна; 3 – контактные ступени; 4 – технологический трубопровод; 5 – смотровое окно; 6 – конденсатор; 7 – теплообменник; 8 – верхние пластины; 9 – нижние пластины; 10 – перегородка; 11 – отверстия; 12 – перфорированные стаканы; 13 – насадка; потоки: → – конденсат с поверхности теплообменника; → – пары; → – конденсат, образованный под пластинами 8

Диаметр колонны составил 219 мм, верхних пластин – 150 мм, нижних пластин – 120 мм. Расстояние между пластинами устанавливалось равным 15 мм. Пластины выполнялись из медного листа толщиной 0,25 мм с высотой отбортовки 1 мм.

Было исследовано два типа насадки, которая размещалась в кольцевой полости, образованной двумя перфорированными стаканами, а именно спирально-призматическая насадка (3×4 мм), выполненная из никромовой проволоки диаметром 0,18 мм, и регулярная насадка – из алюминиевого просечного листа толщиной 1,5 мм.

Наружный диаметр стакана равен 120 мм. Толщина слоя насадки изменялась от 18 до 40 мм, а высота насадки составила 45 и 90 мм. Контактная ступень снабжена теплообменником 7, выполненным из медной трубы диаметром 5 мм с поверхностью 0,012 м². Конденсатор колонны имел поверхность 0,036 м², мощность электронагревателей куба составила 15 кВт.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на модельной смеси этанол-вода.

Эффективность тарелки при осуществлении абсорбции рассчитывалась по зависимости:

$$E_x = \frac{c - c_0}{c^* - c_0}, \quad (1)$$

где c – концентрация кислорода в жидкости на тарелке, кг/м³; c_0 – начальная концентрация кислорода в жидкости, кг/м³; c^* – равновесная концентрация кислорода в жидкости, кг/м³.

Концентрация кислорода в воде определялась датчиком полярографического типа.

Концентрация этанола измерялась в паровой и жидкой фазах. Состав этилового спирта определялся рефрактометром марки LR-3, его тарировка осуществлялась с использованием хромато-масс-спектрометра YCDplus.

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

Эффективность тарелки при ректификации смеси этанол-вода определялась по формуле

$$E_y = \frac{y_{ex} - y_{ent}}{y^* - y_{ent}}, \quad (2)$$

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.

Удельный тепловой поток сконденсировавшихся паров на поверхности теплообменника q , Вт/м², определялся по зависимости

$$q = \frac{Q}{f}, \quad (3)$$

где Q – тепловой поток сконденсировавшихся паров, Вт; f – теплопередающая поверхность теплообменника, м².

$$Q = G \cdot c (t_{ex} - t_{ent}), \quad (4)$$

где G – расход воды через теплообменник, кг/с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); t_{ex} , t_{ent} – выходная и входная температура теплоносителя соответственно, °C.

Коэффициент теплопередачи теплообменника K , Вт/м²·К, определялся по формуле

$$K = \frac{Q}{f \cdot \Delta t}, \quad (5)$$

где Δt – среднелогарифмическая разность температур, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации паров на верхних пластинах $\alpha_{\text{кон}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, рассчитывался по зависимости

$$\alpha_{\text{кон}} = \frac{Q}{F \cdot (t_n - t_c)}, \quad (6)$$

где t_n – температура паров, $^{\circ}\text{C}$; t_c – температура стенки пластины, $^{\circ}\text{C}$; F – поверхность пластины, м^2 .

Коэффициент теплоотдачи при конденсации паров на поверхности теплообменника определялся на основании формулы (5) и расчетного значения коэффициента теплоотдачи. Величина теплового и материального потоков определялась согласно балансам. Величина гидравлического сопротивления измерялась дифференциальным манометром. Температура измерялась термодатчиками марки NTC 10K.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования теплоотдачи при конденсации паров смеси этанол-вода на поверхности теплообменника 7, рис. 2, представлены на рис. 3, а.

Установлено два основных режима процесса конденсации паров: пленочный и псевдокапельный. Смена режимов обусловлена изменением структуры капель и пленки конденсата на поверхности трубы [19]. Согласно полученным данным, с увеличением концентрации этанола в паровой смеси, а также разности температур между конденсирующими парами и стенкой трубы, интенсивность теплоотдачи снижается.

Как нами установлено, значения коэффициента теплоотдачи в псевдокапельном режиме подчиняются зависимостям [20]

$$\text{Nu} = 1,61 \cdot 10^{-7} \text{Re}^{-1,49} \pi_{\kappa}^{0,3} \text{Pr}^{1/3}, \quad (7)$$

где $\text{Nu} = \frac{2\alpha_{\text{кон}} \cdot \sigma \cdot t_n}{\lambda \cdot r \cdot \rho (t_n - t_c)}$ – критерий Нуссельта;

$\text{Re} = \frac{\lambda \cdot (t_n - t_c)}{r \cdot \mu}$ – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля; π_{κ} – число подобия.

Экспериментальные данные при пленочном режиме конденсации паров с погрешностью 35 % подчиняются зависимостям [21]

$$\alpha_{\text{кон}} = C \left[\frac{r \rho^2 \lambda^3 g}{\mu d (t_n - t_c)} \right], \quad (8)$$

где C – постоянная; r – теплота фазового превращения при температуре t_n , Дж/кг; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$; d – диаметр пластины, м.

Уравнение (8) не учитывает влияние на теплоотдачу поверхностного натяжения конденсата, что и обуславливает сравнительно большую погрешность.

Результаты исследования теплоотдачи при конденсации паров на поверхности верхних пластин теплообменника 7, рис. 3, б. Величина коэффициента теплоотдачи оказалась на порядок ниже, чем в случае конденсации на поверхности горизонтальной трубы теплообменника 7. Согласно полученным данным при плотности орошения конденсата менее $0,005 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ наблюдается резкое снижение интенсивности конденсации, что обусловлено появлением несмоченных участков на поверхности пластины. В зависимости от температуры стенки пластины также наблюдается два режима конденсации. Уравнение (8) при значении коэффициента $C = 0,09$ позволяет оценить величину коэффициента теплоотдачи, что показано на рис. 3, б пунктирной линией.

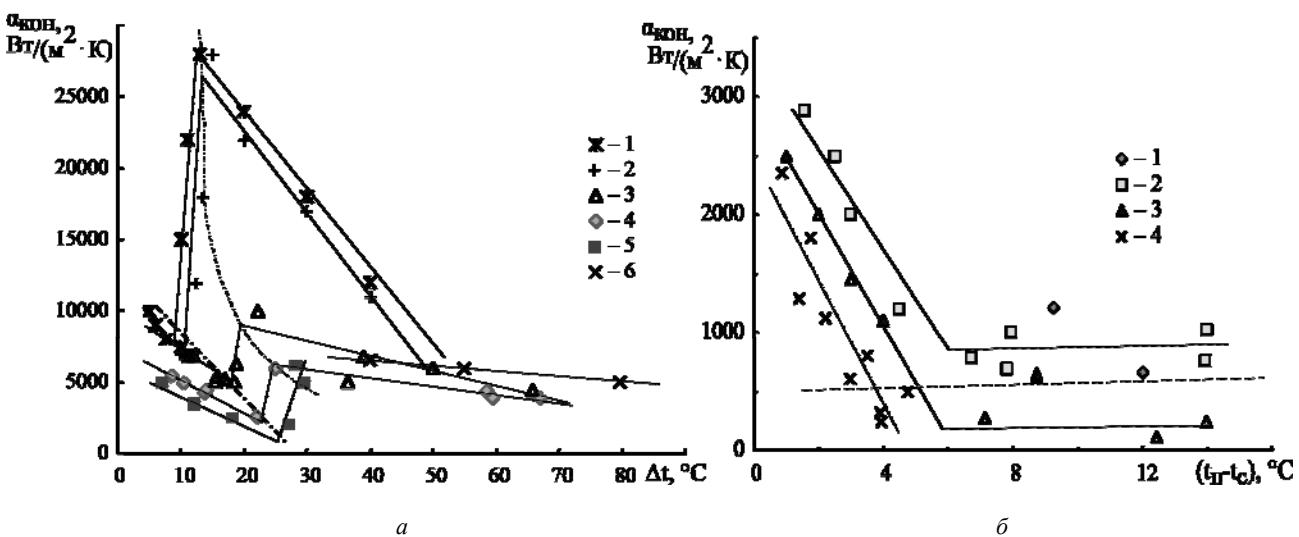


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи на поверхности теплообменника (а) и на верхних пластинах (б) при конденсации паровой смеси от разности температур:

а – экспериментальные точки (1–5): 1 и 2 данные [19] – при концентрации этанола в парах 12 и 14 % мас.; 3–6 данные авторов: 3 – 20 % мас.; 4 – 50 % мас.; 5 – 60 % мас.; 6 – 78–80 % мас. Штрихпунктирные линии – смена режима;

б – экспериментальные точки (1–4): 1 при концентрации этанола 1 – 7 % мас.; 2 – 35 % мас.; 3 – 50 % мас.; 4 – 70 % мас.

Экспериментальные значения расхода испарившихся паров $G_{\text{исп}}$ с поверхности верхней пластины в зависимости от концентрации этанола представлены на рис. 4, а. Как установлено, с увеличением теплоты парообразования или снижения летучести указанный расход снижается.

Следует отметить, что на интенсивность испарения влияют не только теплофизические параметры паровой смеси, но и переохлаждение конденсата на поверхности змеевика, неравномерность орошения и удельная тепловая нагрузка конденсирующихся паров.

Вследствие испарения с поверхности пластины и парциальной конденсации под пластиной происходит изменение концентрации легколетучего компонента по высоте ступени, характерные полученные данные показаны на рис. 4, б.

Для анализа работы пластин на контактной ступени осуществлено измерение температуры паров и конденсата на контактной ступени. Установлено, что конденсат, образованный на поверхности пластины, имеет пониженную температуру в сравнении температурой насыщенных паров. Величина температуры стенки пластины оказалась ниже, чем температура

входящих паров, но выше температуры конденсата на ступени. Снижение температуры конденсата на пластине, в сравнении с температурой конденсирующих паров, обусловлено испарением жидкости.

Результаты исследования гидравлического сопротивления тарелки в зависимости от удельного расхода пара (газа) представлены на рис. 5. Выявлено два гидродинамических режима: слабые и сильные взаимодействия, разграниченные на рисунке штрихпунктирной линией. При дальнейшем увеличении расхода наблюдается подвисание жидкости на насадке и ее выдавливание с образованием брызгоноса и дальнейшей потерей работоспособности контактного устройства.

Как установлено, с увеличением высоты слоя насадки и ее ширины, гидравлическое сопротивление несмоченной тарелки возрастает. Повышение плотности орошения жидкости приводит к росту гидравлического сопротивления устройства. Согласно полученным данным, гидравлическое сопротивление тарелки перекрестного тока для всех исследованных типов насадки не превышает 320 Па, что ниже в сравнении с колпачковыми и клапанными тарелками [22].

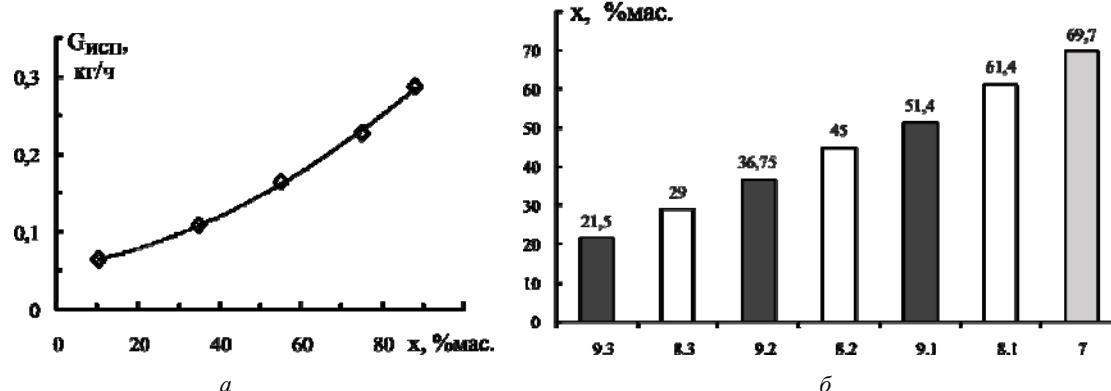


Рис. 4. Изменение расхода паров конденсата с поверхности верхней пластины от концентрации этанола (а) и распределение концентрации этанола на верхних и нижних пластинах (б)

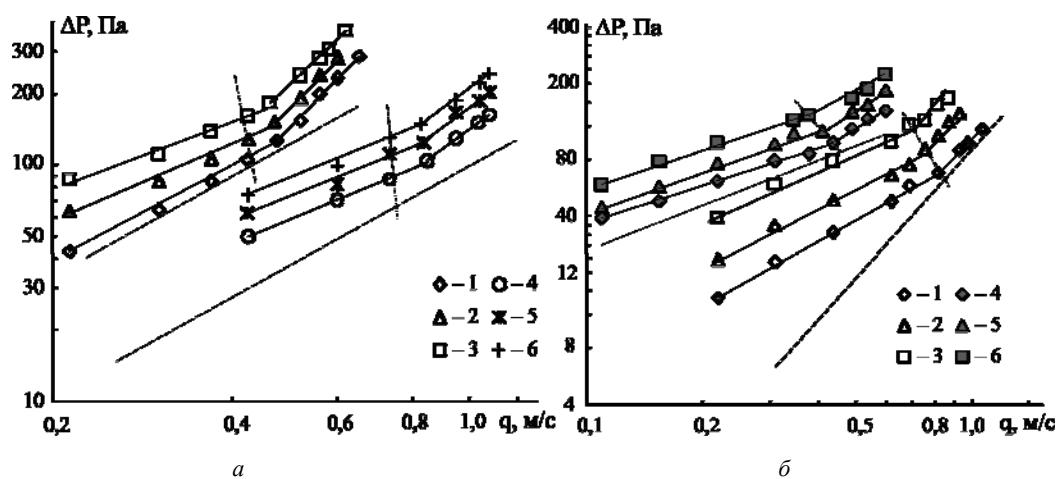


Рис. 5. Зависимость перепада давления контактной ступени от удельного расхода для спирально-призматической (а) и регулярной (б) насадок:

Пунктирные линии – сухая контактная ступень; а – экспериментальные точки (1–6): (1–3) при высоте насадки $h = 90$ мм, ширине $b = 40$ мм, расход жидкости $1 - 1,27 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $2 - 1,83 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $3 - 3 \cdot 10^{-5}$ м³/с; точки (4–6) при $h = 45$ мм, $b = 40$ мм, расход жидкости $4 - 1,20 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $5 - 2,46 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $6 - 4,59 \cdot 10^{-5}$ м³/с;

б – экспериментальные точки (1–6): (1–3) при $h = 50$ мм, $b = 18$ мм, расход жидкости $1 - 0,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $2 - 2,6 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $3 - 3,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с; точки (4–6) при $h = 100$ мм, $b = 25$ мм, расход жидкости $4 - 0,9 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $5 - 2,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $6 - 3,6 \cdot 10^{-5}$ м³/с

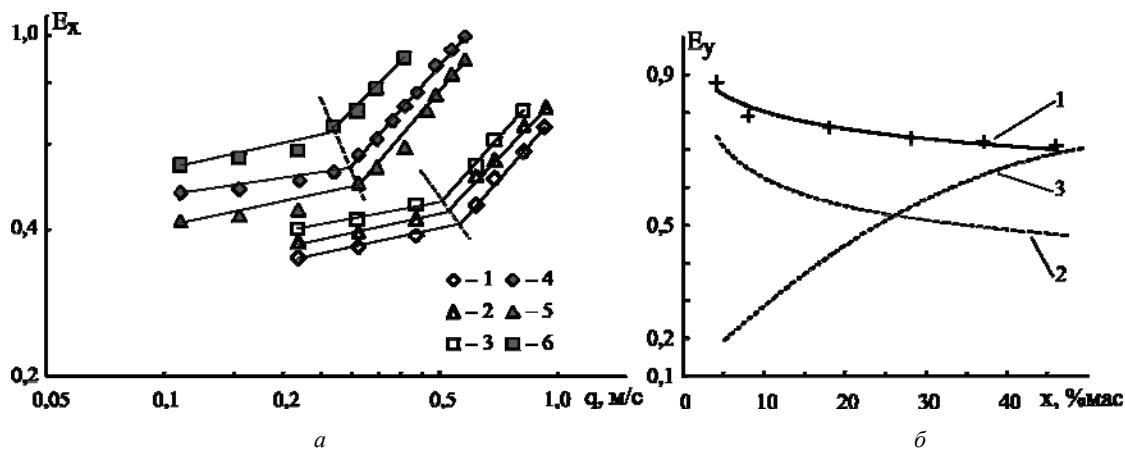


Рис. 6. Эффективности контактной ступени в зависимости от удельной нагрузки (а) и от концентрации

этанола в смеси (б) при флегмовом числе $R = 3$:

а – экспериментальные точки (1–6): (1–3) при $h = 50 \text{ мм}$, $b = 18 \text{ мм}$, расход жидкости $1 - 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $2 - 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $3 - 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; точки (4–6) при $h = 100 \text{ мм}$, $b = 25 \text{ мм}$, расход жидкости $4 - 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $5 - 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $6 - 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$;
б – линии (1–3): 1 – контактное устройство, согласно рис. 2, б; 2 – контактное устройство без пластин; 3 – контактное устройство без насадки

Характерные значения эффективности контактной ступени представлены на рис. 6. Эффективность зависит как от режима взаимодействия пара с жидкостью, рис. 6, а, так и от концентрации легколетучего компонента, рис. 6, б. Таким образом, эффективность разработанного устройства для укрепления паров этанола составила от 0,75 до 0,9.

Сравнение показателей насадочной адиабатической колонны диаметром 0,2 м со спирально-призматической насадкой противоточного тока, представленной в работе [23], с установкой с разработанными контактными устройствами, показало преимущество последней. Достигнуто увеличение фактора скорости по сечению колонны до 0,9, вместо 0,5. Снижение гидравлического сопротивления с 4000 Па до 2640 Па и уменьшение удерживающей способности с 1,1 кг до 0,2 кг, массы насадки с 71 кг до 16 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая эффективность контактной ступени и ее низкая металлоемкость позволяет рекомендовать диабатические ректификационные колонны для работы под вакуумом при разделении смесей в технологиях переработки растительного сырья.

Представленные данные были использованы при расчете ректификационных колонн для получения скипидара и абсолютированного этанола.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Владимирова Т. М., Соколов О. М., Третьяков С. И. Моделирование процесса ректификации и парциальной конденсации при разделении таллового масла // Лесной журнал. 2006. № 3. С. 151–153.
2. Селянина Л. И. Получение концентрата пальмитиновой кислоты на установке парциальной конденсации // Лесной журнал. 1999. № 5. С. 82–86.
3. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / В. М. Олевский, В. Р. Ручинский, А. М. Кашников, В. И. Чернышев. М. : Химия, 1988. 240 с.

4. Тюрина Е. С., Ильичев И. С., Радбиль А. Б., Семенчева Л. Л., Лазарев М. А., Маврина Е. А., Шалашова А. А. Очистка сульфатного скипидара-сырца от серосодержащих соединений // Лесной журнал. 2017. № 1. С. 177–185.

5. Lopez-Saucedo E. S., Grossmann I. E., Segovia-Hernandez J. G., Hernández S. Rigorous modelling, simulation, and optimization of a conventional and nonconventional batch reactive distillation column: A comparative study of dynamic optimization approaches. Chemical Engineering Research and Design. 2016. Т. 111. С. 83–99. [Google Scholar] [CrossRef].

6. Comparison of heterogeneous azeotropic distillation and energy-saving extractive distillation for separating the acetonitrile-water mixtures / J. Qi, Y. Li, J. Xue, R. Qiao, Z. Zhang, Q. Li // Separation and Purification Technology. 2020. Т. 238. С. 116487. [Google Scholar] [CrossRef].

7. Kiss A. A., Smith R. Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry // Energy. 2020. Т. 203. С. 117788. [Google Scholar] [CrossRef].

8. Jana A. K. An internal thermal integration arrangement for multicomponent batch rectifier: Introducing vapor recompression mechanism // Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2022. Т. 180. С. 108771. [Google Scholar] [CrossRef].

9. Ray S, Das G. Column and Column Internals for Gas-Liquid and Vapour–Liquid Contacting // Process Equipment and Plant Design. 2020. Pp. 427–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814885-3.00014-2>.

10. Overview of Methods to Control the Liquid Distribution in Distillation Columns with Structured Packing: Improving Separation Efficiency / A. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, V. E. Zhukov, G. Meski, P. Houghton // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 132. P. 110092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110092>.

11. Concentric Heat Integrated Distillation Column (HIDiC): a New Specific Packing Design, Characterization and Pre-Industrial Pilot Unit Validation /

- M. Marin-Gallego, B. Mizzi, D. Rouzineau, C. Gourdon, M. Meyer // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2022. Vol. 171. 108643. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108643>.
12. 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, № 2. 29. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020029>.
13. A study of diabatic distillation in a column with a low pressure drop / N. Voinov, D. Zemtsov, N. Deryagina, A. Bogatkova, O. Zhukova // *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. Vol. 185. P. 10.1016/j.cherd. 2022.06.033.
14. Земцов Д. А., Войнов Н. А. Укрепляющая колонна на основе эффектов термической ректификации // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. 33, № 3–4. С. 153–155.
15. Войнов Н. А., Земцов Д. А., Жукова О. П. Исследование термической ректификации в колонне с низким массообменом на ступенях // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51, № 2. С. 174–181.
16. Патент № 2803963 Российской Федерации. МПК B01D 3/18 (2006.01). Контактная ступень колонны термической ректификации : № 2022132690: заявл. 14.12.2022 : опубл. 25.09.2023 / Войнов Н. А., Земцов Д. А.; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 6 с.: ил.
17. Патент № 2755176 РФ, МПК B01D 3/26. Контактная ступень колонны термической ректификации : № 2020137862 : заявл. 17.11.2020 : опубл. 13.09.2021 / Н. А. Войнов, Д. А. Земцов, О. П. Жукова, Н. В. Дерягина; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 6 с.: ил.
18. Патент № 2817641 Российской Федерации. МПК B01D 3/20 (2006.01). Контактная ступень колонны термической ректификации : № 2023111754: заявл. 03.05.2023 : опубл. 17.04.2024 / Войнов Н. А., Земцов Д. А., Богаткова А. В., Чернов В. А.; заявитель СибГУ им. М. Ф. Решетнева. 6 с.: ил.
19. Чиндяков А. А., Смирнов Ю. Б. Теплообмен при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода-этанол на гладких и оребренных трубах // Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 46–54.
20. Чиндяков А. А., Смирнов Ю. Б. Обобщение опытных данных по теплообмену при псевдокапельной конденсации паровой смеси вода-этанол на трубах // Вестник МЭИ. 2014. № 2. С. 19–23.
21. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : пособие для вузов ; под ред. чл.-корр. РАН П. Г. Романкова. 12-е изд. М. : ООО ТИД «Альянс», 2005. 576 с.
22. Контактные насадки промышленных тепло-массообменных аппаратов : монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов ; под ред. А. Г. Лаптева. Казань : Отечество, 2013. 454 с.
23. Ректификация этилового спирта в колоннах со спирально-призматической насадкой / Н. А. Войнов, О. П. Жукова, А. Н. Войнов, В. А. Паньков // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 4 (27). С. 95–99.
- REFERENCES**
1. Vladimirova T. M., Sokolov O. M., Tret'yakov S. I. Modelirovanie processa rektifikacii i parcial'noj kondensacii pri razdelenii tallovoogo masla // Lesnoj zhurnal. 2006. № 3. S. 151–153.
 2. Selyanina L. I. Poluchenie koncentrata pal'mitinovoj kisloty na ustanovke parcial'noj kondensacii // Lesnoj zhurnal. 1999. № 5. S. 82–86.
 3. Plenochnaya teplo- i massoobmennaya apparatura (Processy i apparaty himicheskoy i neftekhimicheskoy tekhnologii) / V. M. Olevskij, V. R. Ruchinskij, A. M. Kashnikov, V. I. Chernyshev. M. : Himiya, 1988. 240 s.
 4. Ochistka sul'fatnogo skipidara-syrca ot serasoderzhashchih soedinenij / E. S. Tyurmina, I. S. Il'ichev, A. B. Radbil', L. L. Semenycheva, M. A. Lazarev, E. A. Mavrina, A. A. Shalashova // Lesnoj zhurnal. 2017. № 1. S. 177–185.
 5. Lopez-Saucedo E. S., Grossmann I. E., Segovia-Hernandez J. G., Hernández S. Rigorous modelling, simulation, and optimization of a conventional and nonconventional batch reactive distillation column: A comparative study of dynamic optimization approaches. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016. Т. 111. С. 83–99. [Google Scholar] [CrossRef].
 6. Comparison of heterogeneous azeotropic distillation and energy-saving extractive distillation for separating the acetonitrile-water mixtures / J. Qi, Y. Li, J. Xue, R. Qiao, Z. Zhang, Q. Li // *Separation and Purification Technology*. 2020. Т. 238. С. 116487. [Google Scholar] [CrossRef].
 7. Kiss A. A., Smith R. Rethinking energy use in distillation processes for a more sustainable chemical industry // *Energy*. 2020. Т. 203. С. 117788. [Google Scholar] [CrossRef].
 8. Jana A. K. An internal thermal integration arrangement for multicomponent batch rectifier: Introducing vapor recompression mechanism // *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2022. Т. 180. – С. 108771. [Google Scholar] [CrossRef].
 9. Ray S, Das G. Column and Column Internals for Gas–Liquid and Vapour–Liquid Contacting // *Process Equipment and Plant Design*. 2020. Pp. 427–523. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814885-3.00014-2>.
 10. Overview of Methods to Control the Liquid Distribution in Distillation Columns with Structured Packing: Improving Separation Efficiency / A. N. Pavlenko, N. I. Pecherkin, V. E. Zhukov, G. Meski, P. Houghton // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 132. P. 110092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110092>.
 11. Concentric Heat Integrated Distillation Column (HIDiC): a New Specific Packing Design, Characterization and Pre-Industrial Pilot Unit Validation / M. Marin-Gallego, B. Mizzi, D. Rouzineau, C. Gourdon, M. Meyer // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2022. Vol. 171. 108643. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108643>.
 12. 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, № 2. 29. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020029>.

13. A study of diabatic distillation in a column with a low pressure drop / N. Voinov, D. Zemtsov, N. Deryagina, A. Bogatkova, O. Zhukova // Chemical Engineering Research and Design. 2022. Vol. 185. P. 10.1016/j.cherd. 2022.06.033.
14. Zemcov D. A., Vojnov N. A. Ukrayushchaya kolonna na osnove effektov termicheskoy rektifikacii // Hvojnye boreal'noj zony. 2015. T. 33, № 3–4. S. 153–155.
15. Vojnov N. A., Zemcov D. A., Zhukova O. P. Issledovanie termicheskoy rektifikacii v kolonne s nizkim massoobmenom na stupenyah // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. 2017. T. 51, № 2. S. 174–181.
16. Patent № 2803963 Rossijskaya Federaciya. MPK B01D 3/18 (2006.01). Kontaktnaya stupen' kolonny termicheskoy rektifikacii : № 2022132690: zayavl. 14.12.2022 : opubl. 25.09.2023 / Vojnov N. A., Zemcov D. A.; zayavitel' SibGU im. M. F. Reshetneva. 6 s.: il.
17. Patent № 2755176 RF, MPK B01D 3/26. Kontaktnaya stupen' kolonny termicheskoy rektifikacii: № 2020137862: zayavl. 17.11.2020 : opubl. 13.09.2021 / N. A. Vojnov, D. A. Zemcov, O. P. Zhukova, N. V. Deryagina; zayavatel' SibGU im. M. F. Reshetneva. 6 s.: il.
18. Patent № 2817641 Rossijskaya Federaciya. MPK B01D 3/20 (2006.01). Kontaktnaya stupen' kolonny termicheskoy rektifikacii : № 2023111754: zayavl. 03.05.2023 : opubl. 17.04.2024 / Vojnov N. A., Zemcov D. A., Bogatkova A. V., Chernov V. A.; zayavitel' SibGU im. M. F. Reshetneva. 6 s.: il.
19. Chindyakov A. A., Smirnov Yu. B. Teploobmen pri psevdokapel'noj kondensacii parovoj smesi voda-etalon na gladkih i orebrennyh trubah // Vestnik MEI. 2013. № 1. S. 46–54.
20. Chindyakov A. A., Smirnov Yu. B. Obobshchenie optychnyh dannyh po teploobmenu pri psevdokapel'noj kondensacii parovoj smesi voda-etalon na trubah // Vestnik MEI. 2014. № 2. S. 19–23.
21. Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskoy tekhnologii : posobie dlya vuzov / K. F. Pavlov, P. G. Romankov, A. A. Noskov ; pod red. chl.-kor. RAN P. G. Romankova. 12-e izd. M. : OOO TID «Al'yans», 2005. 576 s.
22. Kontaktnye nasadki promyshlennyh teplomassobmennyyh apparatov: monografiya / A. M. Kagan, A. G. Laptev, A. S. Pushnov, M. I. Farahov; pod red. A. G. Lapteva. Kazan': Otechestvo, 2013. 454 s.
23. Rektifikaciya etilovogo spirta v kolonnah so spiral'no-prizmaticheskoy nasadkoj / N. A. Vojnov, O. P. Zhukova, A. N. Vojnov, V. A. Pan'kov // Tekhnika i tekhnologiya pishchevyh proizvodstv. 2012. № 4 (27). S. 95–99.

© Чернов В. А., Кожухова Н. Ю.,
Жукова О. П., Войнов Н. А., 2025

Поступила в редакцию 18.06.2025
Принята к печати 04.08.2025