

УДК 66.01

КОНТАКТНЫЕ СТУПЕНИ НЕАДИАБАТНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Н.А. Войнов*, Д.А. Земцов, О.П. Жукова

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
аэрокосмический университет
имени академика М.Ф. Решетнева»,
660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 82

*e-mail: Voynov@Siberianet.ru

Дата поступления в редакцию: 17.01.2017

Дата принятия в печать: 23.01.2017

Аннотация. На основании разработанного способа термической ректификации, заключающегося в осуществлении частичной конденсации поднимающихся паров смеси по высоте колонны и испарении полученного конденсата до его смешения с основным потоком стекающей флегмы, исследован и интенсифицирован процесс укрепления смеси этанол – вода на контактных ступенях с высоким и низким массообменном. Процесс неадиабатной ректификации осуществлялся на контактных ступенях, а затем проводился в колоннах с 24 контактными ступенями. Интенсивный массообмен достигался путем использования вихревых ступеней, выполненных на основе тангенциальных завихрителей. Контактные ступени с низким массообменном изготавливались из медных горизонтально установленных профилированных пластин. В работе представлены технологические параметры, характеризующие смену режима течения вращающегося слоя на вихревой ступени. Также определена величина коэффициента гидравлического сопротивления устройства. Получена зависимость для определения эффективности контактной ступени, которая оценивалась по Мерфи. Установлено, что эффективность вихревой ступени зависит от соотношения потоков, высоты слоя жидкости, центробежного критерия Рейнольдса вращающегося слоя, а также тангенса угла наклона равновесной кривой. При исследовании ступеней, выполненных из пластин, установлено, что наибольший вклад в укрепление смеси дают процессы испарения и конденсации, протекающие на верхних пластинах устройства. Выявлена зависимость для оценки эффективности контактной ступени из пластин, которая зависит от удельного расходов флегмы и паровой смеси, поверхности конденсации и испарения, а также радиальной скорости пара между пластинами. С целью интенсификации процесса разделения осуществлено вращение флегмы, размещенной на нижних пластинах каждой ступени колонны, путем их установки на вал электродвигателя. Показано, что вращение жидкости интенсифицирует процесс массообмена как в жидкой, так и в паровой фазах. Как установлено, с увеличением числа оборотов пластины и концентрации легколетучего компонента в смеси эффективность ступени возрастает, что обусловлено интенсификацией перемешивания фаз. В колонне при вращении флегмы на пластинах в условиях термической ректификации достигнуто увеличение общей эффективности ступени в 2 раза. Наибольшая общая эффективность ступени в колоннах термической ректификации достигается при разности температуры пара на верхней ступени и охлаждающей воды в дефлегматоре этой ступени, равной 8–25 °С. Даны рекомендации по использованию разработанных контактных ступеней в колоннах термической ректификации.

Ключевые слова. Неадиабатная ректификация, термическая ректификация, контактные устройства, эффективность, флегмовое число

NONADIABATIC RECTIFICATION CONTACT DEVICES

N.A. Voinov*, D.A. Zemtsov, O.P. Zhukova

Siberian State Aerospace University,
82, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia

*e-mail: Voynov@Siberianet.ru

Received: 17.01.2017

Accepted: 23.01.2017

Abstract. On the basis of the developed method of heat rectification implying partial condensation of the vapor mixture rising along the height of the column and the resulting evaporation of condensate before it is mixed with the main stream of the flowing reflux the process of strengthening the ethanol-water mixture in the contact levels with high and low mass exchange is investigated and intensified. The process of nonadiabatic rectification was carried out on the contact steps, and then held in the columns with 24 contact stages. The intensive mass transfer was achieved using a vortex steps performed by tangential swirlers. Contact stages of low-mass exchange were made of horizontally installed profiled copper plates. The paper presents the technological parameters which change the flow regime of the rotating layer on vortex stage. The value of the hydraulic resistance coefficient of the device is also determined. The dependence for determining the effectiveness of the contact stage was estimated by Murphree. The efficiency depends on the stage of the vortex flow ratio, fluid bed height, Reynolds centrifugal rotating layer, and the slope of the equilibrium curve. In the study of the steps made of the plates it was revealed that the greatest contribution to the strengthening of the mixture is

allowed by the processes of evaporation and condensation occurring on the upper plate of the unit. The dependence was revealed for assessing the effectiveness of the contact stage of the plates, which depends on the specific expenditure reflux and steam mixture, condensation and evaporation surfaces, and steam radial velocity between the plates. To intensify the separation process the effected reflux rotation plates were disposed on the lower stage of each column by installing them on the motor shaft. It is shown that rotation of the liquid intensifies the mass transfer in the liquid and vapor phases. It is established, that the increasing number of revolutions of the plate and the concentration of volatile component in the mixture increases the efficiency of the stage that is caused by the intensification of stirring phases. While rotating the plates in the column reflux under heat rectification the overall efficiency of the stage increased 2 times. The highest efficiency of separation in distillation columns is achieved when the thermal difference between the steam temperature at the top stage and cooling water in this stage in a dephlegmator at is 8–25 °C. Recommendations for the use of the developed contact stages in columns thermal distillation are given.

Keywords. Nonadiabatic rectification, thermal rectification, contact devices, efficiency, reflux ratio

Введение

Одним из основных условий при конструировании ректификационных установок является выполнение ступеней с высокой разделяющей способностью и низким гидравлическим сопротивлением. Снижение гидравлического сопротивления в колонных аппаратах достигается совершенствованием контактных устройств, однако ограничено воз-

можностями адиабатной ректификации, а уменьшение сопротивления за счет изменения расхода пара приводит к увеличению количества ступеней и, следовательно, сопротивления. Указанное противоречие можно устранить путем применения установок, работающих на основе термической ректификации. Схемы контактных ступеней таких установок представлены на рис. 1.

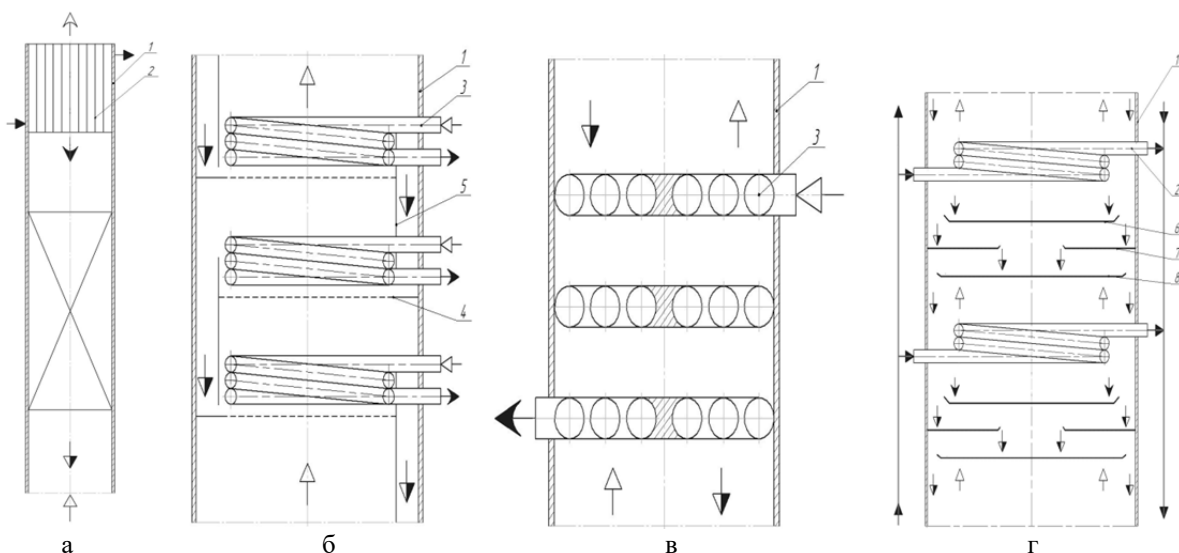


Рис.1. Схемы контактных ступеней термической ректификации:

1 – корпус; 2 – дефлегматор; 3 – подогреватель; 4 – контактное устройство; 5 – переток; 6 – верхняя пластина; 7 – средняя пластина; 8 – нижняя пластина; → – вода; ⇨ – пар; ⇨ – рабочая смесь; ⇨ – конденсат

В колоннах со встроенным дефлегматором, рис. 1а, осуществляется конденсация паров смеси в верхней части установки, что обеспечивает заданный расход флегмы и укрепление паров дистиллята за счет эффекта, вызванного парциальной конденсацией, обусловленного тем, что в конденсат уходит большее количество паров высококипящего компонента. Однако переохлаждение конденсата, стекающего по поверхности дефлегматора, приводит к его охлаждению и тем самым обуславливает накопление примесей в рабочей жидкости по высоте колонны. Известны конструкции дефлегматоров [1, 2], обеспечивающие снижение перепада температуры между флегмой и контактирующими парами до 0,5–1 °C, вместе с тем и они не решают проблему эффективного разделения смеси.

Известны тарельчатые колонны со встроенными или выносными теплообменниками на ступени, рис. 1б, применяемые для подогрева или охлаждения рабочей жидкости [3].

В колонне [3], рис. 1в, осуществляется нагрев рабочей жидкости на поверхности змеевиков, выполняющих одновременно роль провальных тарелок.

Разработан и апробирован способ проведения термической ректификации [4, 5], рис. 1г, при котором на каждой ступени осуществляется частичная конденсация поднимающихся паров смеси и испарение полученного конденсата до смешения его с основным потоком стекающей флегмы в аппарате. В этом случае, как показал анализ, использование способов термической ректификации позволяет конструировать установки с низким гидравлическим сопротивлением и высокой эффективностью, так как для интенсификации процесса используется не только массообмен на ступенях, но и термические эффекты, вызванные испарением флегмы, образованной на ступени, и парциальной конденсацией поднимающихся паров. В таких конструкциях уменьшается время воздействия на про-

дукт высокой температуры, а вследствие размещения небольшого количества обрабатываемого продукта в зоне контакта осуществляется разделение термолабильных и химически нестойких веществ.

Уменьшение диаметра колонны по ее высоте и толщины слоя теплоизоляции также позволяют снизить капитальные затраты и обеспечить качественную герметизацию элементов аппарата, работающего под вакуумом, что уменьшает доступ в аппарат кислорода из воздуха и препятствует в ряде случаев окислению обрабатываемого продукта, повышая его качество. Кроме того, возможна эффективная обработка небольших объемов исходного продукта с постоянно меняющимся составом.

Целью работы является анализ работы колонн термической ректификации с различными ступенями массообмена и определение их эффективности.

Объекты и методы исследований

Использовалась смесь этиловый спирт – вода с начальной концентрацией этанола в кубе 0,5–75 % мас. Состав этилового спирта определялся с использованием хроматомасспектрометра YCD plus, а также при помощи рефрактометра марки LR-3 Polskie Zaklady Opcznie, WKC Warszawa. Концентрация этанола измерялась в паровой и жидкой фазах. Показания температуры определялась термометрами сопротивления марки TCM-9418.

Флегмовое число при термической ректификации определялось согласно

$$R = L_c / L_d ,$$

где L_c – расход сконденсированных паров на поверхности дефлегматора; L_d – расход дистиллята.

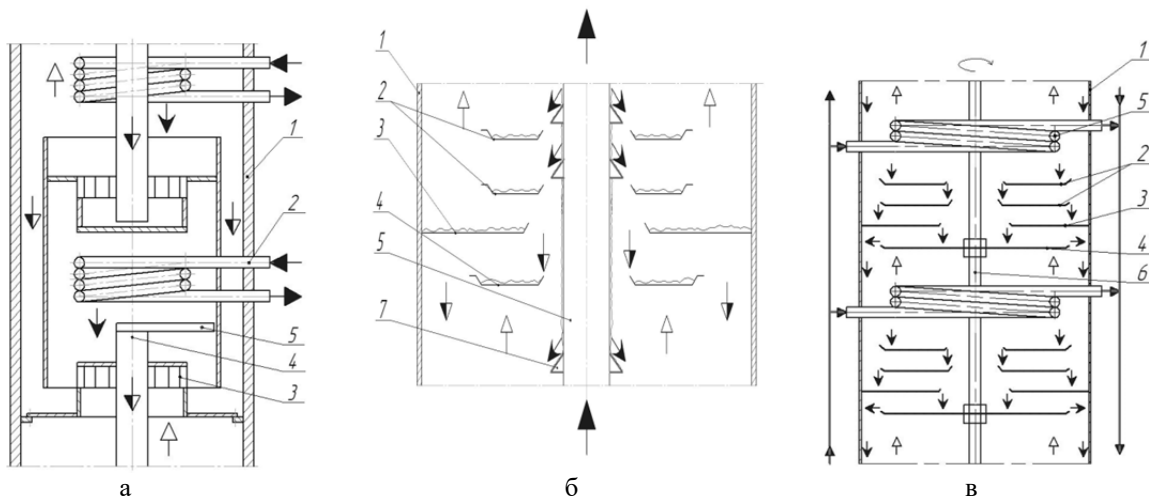


Рис. 2. Схемы исследованных контактных ступеней:

- а: 1 – корпус; 2 – конденсатор; 3 – завихритель; 4 – переток; 5 – сливная планка; б, в: 1 – корпус; 2 – верхние пластины; 3 – средняя пластина; 4 – нижняя пластина; 5 – конденсатор; 6 – вал; 7 – распределитель → – вода; ⇨ – пар; ⇨ – рабочая смесь; ⇨ – конденсат

Общая эффективность ступени выражалась как отношение числа теоретических к числу действительных тарелок в исследуемой колонне, согласно

$$E = N_t / N_r .$$

Эффективность ступени оценивалась по Мерфи и определялась по формулам

$$E_y = \frac{y_n - x_{n-1}}{y^*(x_n) - x_{n-1}} ,$$

где y_{n-1} – концентрация пара, поступающего на контактную ступень, % мас.; y_n – концентрация пара, покидающего контактную ступень, % мас.; $y^*(x_n)$ – концентрация пара, равновесная с концентрацией соответствующей фазы, покидающей ступень, % мас.

$$E_x = \frac{x_{in} - x_{out}}{x_{in} - x^*} ,$$

где x_{in} – концентрация жидкости, поступающей на ступень, % мас.; x_{out} – концентрация жидкости, покидающей ступень, % мас.; x^* – концентрация жидкости, равновесной с составом соответствующей фазы, покидающей ступень, % мас.

Величины коэффициента сопротивления завихрителя ξ рассчитывалась согласно зависимости

$$\xi = (2 \cdot \Delta P_{сyx}) / (\rho_g \cdot v^2) ,$$

где $\Delta P_{сyx}$ – гидравлическое сопротивление сухой ступени, Па; ρ_g – плотность газа, кг/м³; v – скорость газа в каналах завихрителя, м/с.

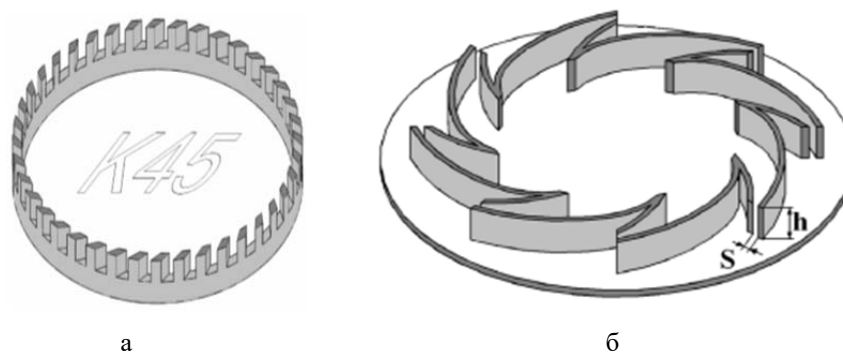


Рис. 3. Схемы завихрителей (а – К-45, б – V-8)

Схемы исследованных контактных ступеней при термической ректификации представлены на рис. 2. Колонна с вихревыми контактными устройствами, рис. 2а, состояла из 24 ступеней диаметром и высотой 100 мм. На каждой ступени в паровом пространстве устанавливался конденсатор (дефлегматор), выполненный в виде змеевика из медной трубки диаметром 8 мм с поверхностью теплообмена $0,01 \text{ м}^2$. В качестве устройств, обеспечивающих вращательное движение смеси на ступени, применялись тангенциальные завихрители типа К45 диаметром 88 мм с 36 параллельными каналами шириной 1 мм и высотой 9 мм, рис. 3а, а также устройства V8 с 8 каналами шириной 2,5 мм и высотой 12 мм, рис. 3б.

Величина коэффициента теплопередачи в конденсаторе (рис. 2а, в) составила $(100\text{--}300) \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, а тепловой поток передаваемый от конденсируемого пара на ступени к охлаждающей воде, $80\text{--}110 \text{ Вт}$.

Колонна с пластинчатыми контактными устройствами (рис. 2б, в) была выполнена из царг диаметром 200 мм, высотой 70 мм, снабжена 24 контактными ступенями, состоящими из нижней, средней и верхних пластин, изготовленных из медного листа толщиной 0,5 мм, края которых были отбортованы на высоту 1 мм для образования слоя конденсата на их поверхности. Диаметр верхних пластин выполнялся равным 170 мм. Расстояние между пластинами выдерживалось $15\text{--}30 \text{ мм}$. По оси колонны устанавливалась труба (дефлегматор), выполненная диаметром $26 \times 1 \text{ мм}$ и длиной 1,8 м, в полость которой подавалась охлаждающая вода (теплоноситель) с начальной температурой $10\text{--}62 \text{ }^\circ\text{C}$.

Величина коэффициента теплоотдачи при движении теплоносителя в полости дефлегматора при наличии в нем канала шириной 2 мм составила $3000\text{--}8000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

При организации гравитационного стекания теплоносителя в виде пленки по внутренней поверхности дефлегматора (поз. 5 рис. 2б) усложняется поддержанием температуры конденсата в заданном соответствии с температурой контактирующего пара по высоте колонны. Создание пленочного восходящего течения теплоносителя по внутренней поверхности дефлегматора позволило [6] довести значения коэффициентов теплоотдачи до $8000\text{--}16000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ при сравнительно меньшем расходе охлаждающей воды. При этом величина коэффициента теплоотдачи при конденсации паров

смеси этанол – вода на поверхности дефлегматора составила $7000\text{--}10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Величина коэффициента теплоотдачи при испарении конденсата на поверхности верхних пластин и удельной тепловой нагрузке $10000\text{--}30000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ составила $80\text{--}100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

Колонна, представленная на рис. 2в, состояла из 10 ступеней, выполненных из пластин, аналогично рис. 2б, нижние пластины приводились во вращение путем установки их на вал электродвигателя.

Результаты и их обсуждение

При работе вихревых ступеней в зависимости от расхода пара наблюдается три режима взаимодействия: барботажный, кольцевой и пленочный. Рабочим режимом является кольцевой, так как он обеспечивает вращение жидкости на ступени при меньших значениях гидравлического сопротивления.

Для практического определения величины критической скорости v_k , при которой происходит смена режимов течения (из барботажного в кольцевой), получены [7–9] зависимости в виде

$$v_k = C \cdot (f/F)^{-0,37} \cdot (m/S)^{0,4} \cdot (1/\cos\alpha)^{0,5},$$

где C – коэффициент, равный 3,1; f – площадь сечения каналов для прохода пара, м^2 ; $F = \pi \cdot D_z \cdot h$, м^2 ; D_z – диаметр завихрителя; m – масса жидкости на ступени, кг; S – поверхность жидкости на ступени, м^2 ; α – угол наклона каналов для выхода газа, град.

Переход из кольцевого режима течения газожидкостного слоя в пленочный осуществляется при достижении соотношения скоростей $u_n/u_k = 0,4\text{--}0,5$.

Величина коэффициента сопротивления сухой ступени с вихревыми контактными устройствами при кольцевом режиме составила [7–9] $\xi = 0,8\text{--}1,8$, а гидравлическое сопротивление орошаемой ступени в интервале скоростей обеспечивающих кольцевой режим $550\text{--}2500 \text{ Па}$.

Величина объемного коэффициента массоотдачи, согласно [10], на исследуемых вихревых ступенях составила $\beta_v = (150\text{--}400) \text{ ч}^{-1}$. Исходя из значений межфазной поверхности $(600\text{--}1200) \text{ м}^{-1}$, величина поверхностного коэффициента $\beta = (0,4\text{--}1,3)10^4 \text{ м}/\text{с}$.

Основываясь на исследованиях массообмена при абсорбции и данных, полученных при ректи-

фикации, зависимость для расчета эффективности вихревых ступеней в кольцевом режиме при адиабатной ректификации представлена в виде [11]

$$E_y = 0,035 m^{0,16} (G/L)^{-0,15} (H/h)^{0,4} (Re)^{0,24},$$

где m – тангенс угла наклона равновесной кривой; G/L – отношение расхода пара к расходу жидкости; H/h – отношение высоты слоя жидкости к высоте канала завихрителя; Re – центробежный критерий Рейнольдса (5000–15000). Угловая скорость вращения газожидкостной смеси согласно [6, 8].

Значения эффективности вихревой контактной ступени при адиабатной и термической ректификации представлены на рис. 4.

При термической ректификации в колонне с вихревыми ступенями протекает парциальная конденсация и испарение легколетучего компонента.

Так как эффективность ступени по Мерфи составила больше единицы, рис. 4, можно предположить, что эффективность обусловлена как массообменными, так и термическими эффектами.

Наибольшая эффективность разделения достигается при достижении разности температуры пара на верхней ступени и охлаждающей воды в конденсаторе этой ступени $\Delta t = 8\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$ [11].

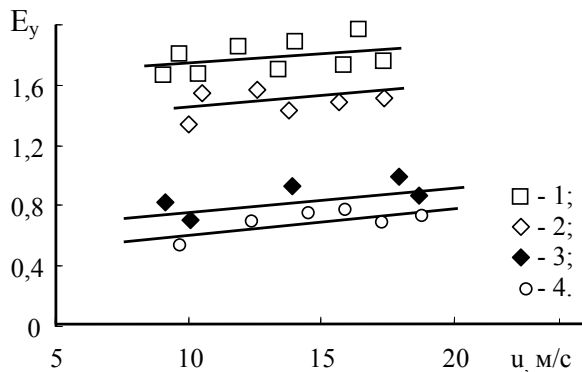


Рис. 4. Зависимость эффективности вихревой ступени от скорости пара в каналах завихрителя при термической ректификации при флегмовом числе $R = 0,8\text{--}3$, $\Delta t = 10\text{--}20\text{ }^\circ\text{C}$. Экспериментальные точки (1–4): 1 – $x = 65\text{--}70\text{ } \%$ мас., 2 – $x = 30\text{ } \%$ мас., 3 – $x = 20\text{ } \%$ мас.; 4 – адиабатная ректификация при $x = 65\text{ } \%$ мас.

Эффективность контактной ступени, выполненной из пластин. При физической абсорбции эффективность ступени составила небольшую величину 0,1. При исследовании термической ректификации в исследуемой колонне выявлено, что большое влияние на процесс оказывает температура конденсата. Согласно экспериментальным данным, при длине дефлегматора 70 мм и расходе конденсата 2–6 кг/час, температура конденсата на его поверхности на 5–8 $^\circ\text{C}$ ниже его температуры кипения. Переохлаждение конденсата не позволяет испарять из него необходимое количество летучего компонента на пластинах, что приводит к возврату

излишней части этанола с потоком флегмы в кубовую часть колонны. Установка дополнительных верхних пластин на каждой ступени позволяет довести температуру конденсата до кипения и качественно осуществить разделение. Изменение концентрации этанола в дистилляте в зависимости от флегмового числа и варианта используемой колонны представлена на рис. 5.

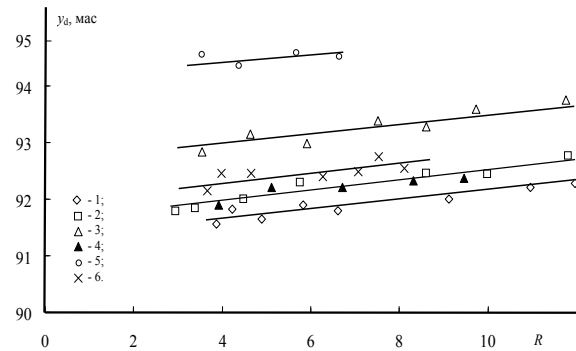


Рис. 5. Зависимость концентрации этанола в дистилляте от флегмового числа в колонне с 24 ступенями. Экспериментальные точки (1–6): ступени из пластин при $F = 0,09\text{ м}^2$ 1 – $Q = 4\text{ кВт}$; 2 – $Q = 7\text{ кВт}$; 3 – $Q = 13\text{ кВт}$; 4 – $Q = 13\text{ кВт}$ при $F = 0,046\text{ м}^2$; вихревые ступени 5 – $Q = 15\text{ кВт}$; 6 – колонна с десятью ступенями и вращающимися нижними пластинами при $Q = 13\text{ кВт}$

Интенсивность укрепления паров смеси за счет эффекта, вызванного парциальной конденсацией на поверхности дефлегматора и пластин, возрастает с уменьшением концентрации этанола в конденсате и повышением его расхода. Эффективность по Мерфи, обусловленная испарением с поверхности пластин, имеет зависимость вида

$$E_y \approx l_c^{-0,56} G_{\text{out}}^{-0,18} F^{0,4} u^{0,2},$$

где l_c – удельный расход флегмы; G_{out} – расход паровой смеси; F – поверхность конденсации и испарения; u – радиальная скорость пара между пластинами. Это соотношение получено при $L = 0,005\text{--}0,03\text{ кг/м}^2$ и концентрации этанола $x = 0,5\text{--}60\text{ } \%$ мас. Расход пара при исследовании изменялся в интервале $(0,1\text{--}1,0) \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$, поверхность контакта – в интервале $(0,05\text{--}0,1)\text{ м}^2$, скорость паров, перемещающихся в радиальном направлении между пластинами составила 0,07–2 м/с.

Эффективность ступеней по высоте колонны не одинакова и зависит также от начальной температуры охлаждающей воды, подаваемой в дефлегматор колонны. Вклад дефлегматора в общую эффективность ступени, выполненной из пластин, составил 13 %, вклад нижней и средней пластины не более 25 %. Наибольший вклад в укрепление смеси дают процессы испарения и конденсации, протекающие на верхних пластинах ступени. Сопротивление исследуемой колонны с 24 ступенями, выполненными из пластин, достигало 100 Па.

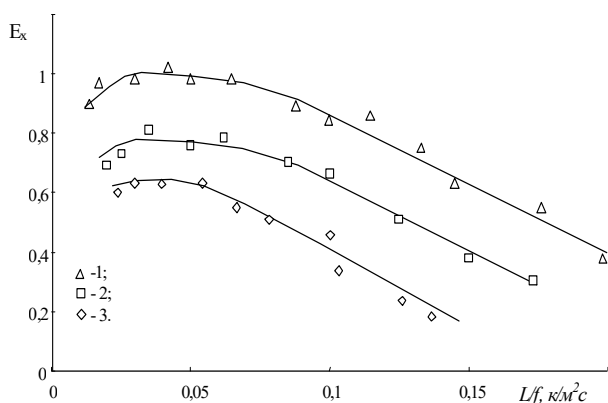


Рис. 6. Изменение эффективности по Мерфи на ступени с одной вращающейся пластиной от плотности орошения L/f при $n = 900$ об/мин. Экспериментальные точки (1–3): 1 – концентрация этанола в отработанной жидкости $x = 17\%$ мас.; 2 – $x = 6\%$ мас.; 3 – $x = 17\%$ мас., неподвижная пластина

В этой связи, для интенсификации процесса массообмена на нижних пластинах ступеней осуществлено их вращение, согласно рис. 2в. В этом случае (рис. 6, точки 1 и 2) общая эффективность достигала единицы. Также установлено, что вра-

щение пластин интенсифицирует процесс массообмена не только в жидкой, но и в паровой фазе.

Выводы

Таким образом, воздействие термических эффектов на конденсат, образованный на каждой ступени, до ввода его в основной поток стекающей флегмы, позволяет увеличить в 3–4 раза общую эффективность ступени по сравнению с адиабатической ректификацией.

Для многотоннажных производств, работающих при атмосферном давлении, целесообразно конструировать ступени с высокими массообменными параметрами, усиленными термическими эффектами.

Для колонн, работающих под вакуумом, рекомендуется использовать термическую ректификацию на ступени с низким гидравлическим сопротивлением.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания по теме «Закономерности гидродинамических, химических и биохимических процессов в технологиях глубокой переработки растительного сырья и органического синтеза», номер государственной регистрации НИР: 10.8196.2017/БЧ.

Список литературы

1. Ректификация этилового спирта в колоннах со спирально-призматической насадкой / А.Н. Войнов, О.П. Жукова, В.А. Паньков, Н.А. Войнов // Техника и технология пищевых производств. 2012. – № 4. – С. 1–5.
2. Voinov, N.A. Hydrodynamics and Mass Exchange in Vortex Rectifying Column / N.A. Voinov, N.A. Nikolaev, A.V. Kustov // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2009. – Vol. 82, No. 4. – P. 730–735.
3. Гордон, Л. В. Технология и оборудование лесохимических производств / Л.В. Гордон, С.О. Скворцов, В.И. Лисов. – М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 360 с.
4. Пат. 2437698 Российская Федерация, МПК В01D3/14 С1. Способ ректификации / Н.А. Войнов, В.А. Паньков, А.Н. Войнов; заявитель – № 2010118012/05; заявл. 04.05.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. – 7 с.
5. Пат. 2445996 Российская Федерация, МПК В01D3/14 С1. Ректификационная колонна / Н.А. Войнов, В.А. Паньков, А.Н. Войнов; заявитель – № 2010118010/05; заявл. 04.05.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 6 с.: ил.
6. Войнов, Н.А. Теплосъем при пленочном течении жидкости / А.Н. Войнов, Ал.Н. Николаев. – Казань: Отечество, 2011. – 224 с.
7. Войнов, Н.А. Гидродинамика вихревой ступени с тангенциальными завихрителями / Н.А. Войнов, О.П. Жукова, Н.А. Николаев // Теоретические основы химической технологии. – 2010. – Т. 44. – № 2. – С. 225–232.
8. Войнов, Н.А. Гидродинамика и массообмен на ступени с профилированными тангенциальными каналами / Н.А. Войнов, С.А. Ледник // Химическая промышленность. – 2011. – Т. 88. – № 5. – С. 250–256.
9. Войнов, Н.А. Вихревая контактная ступень для теплообменных процессов / Н.А. Войнов, О.П. Жукова, С.А. Ледник // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 9. – С. 9–11.
10. Войнов, Н.А. Массообмен в газожидкостном слое на вихревых ступенях / Н.А. Войнов, О.П. Жукова, С.А. Ледник, Н.А. Николаев // Теоретические основы химической технологии. – 2013. – Т. 47. – № 1. – С. 62–67.
11. Эффективность вихревой ступени при термической ректификации / Н.А. Войнов, О.П. Жукова, А.Н. Войнов, Д.А. Земцов // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 5. – С. 525–531.

References

1. Voynov A.N., Zhukova O.P., Pan'kov V.A., Voynov N.A. Rektifikatsiya etilovogo spirta v kolonnakh so spiral'no-prizmaticheskoy nasadkoy [Ethyl alcohol rectification in columns with spiral prismatic nozzle]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2012, no. 4, p. 1–5.
2. Voinov N.A., Nikolaev N.A., Kustov A.V. Hydrodynamics and Mass Exchange in Vortex Rectifying Column. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2009, vol. 82, no. 4, pp. 730–735.
3. Gordon L.V., Skvortsov S.O., Lisov V.I. *Tekhnologiya i oborudovanie lesokhimicheskikh proizvodstv* [Technology and equipment wood chemical industry]. Moscow: Lesn. prom-st' Publ., 1988. 360 p.
4. Voynov N.A., Pan'kov V.A., Voynov A.N. *Sposob rektifikatsii* [The process of rectification]. Patent RF, no. 2437698, 2011.
5. Voynov N.A., Pan'kov V.A., Voynov A.N. *Rektifikatsionnaya kolonna* [The distillation column]. Patent RF, no. 2445996, 2012.
6. Voynov A.N., Nikolaev A.I.N. *Teplos'em pri plenochnom techenii zhidkosti* [The output power at the film flow of liquid]. Kazan': Izdatel'stvo «Otechestvo» Publ., 2011. 224 p.

7. Voynov N.A., Zhukova O.P., Nikolaev N.A. Gidrodinamika vikhreвой stupeni s tangentsial'nymi zavikhritelyami. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii [Hydrodynamics vortex stage with tangential swirlers]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2010, vol. 44, no. 2, pp. 225–232.
8. Voynov N.A., Lednik S.A. Gidrodinamika i massoobmen na stupeni s profilirovannymi tangentsial'nymi kanalami [Hydrodynamics and mass transfer in the stage with profiled tangential channels]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical Industry], 2011, vol. 88, no. 5, pp. 250–256.
9. Voynov N.A., Zhukova O.P., Lednik S.A. Vihrevaya kontaktная stupen' dlya teplomassoobmennykh protsessov [Whirlpool contact stage for the heat and mass transfer processes]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering], 2013, no. 9, pp. 9–11.
10. Voynov N.A., Zhukova O.P., Lednik S.A., Nikolaev N.A. Massootdacha v gazozhidkostnom sloe na vikhrevykh stupenyakh [Mass transfer in the gas-liquid layer on the steps of the vortex]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2013, vol. 47, no. 1, pp. 62–67.
11. Voynov N.A., Zhukova O.P., Voynov A.N., Zemtsov D.A. Effektivnost' vikhreвой stupeni pri termicheskoy rektifikatsii [The effectiveness of the vortex step by thermal distillation]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2016, vol. 50, no. 5, pp. 525–531.

Дополнительная информация / Additional Information

Войнов, Н.А. Контактные ступени неадиабатной ректификации / Н.А. Войнов, Д.А. Земцов, О.П. Жукова // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 44. – № 1. – С. 58–64.

Voinov N.A., Zemtsov D.A., Zhukova O.P. Nonadiabatic rectification contact devices. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 58–64 (In Russ.).

Войнов Николай Александрович

д-р техн. наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 82, тел.: +7 (391) 227-86-19, e-mail: voynov@siberianet.ru

Земцов Денис Андреевич

аспирант кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 82, тел.: +7 (391) 227-86-19, e-mail: denis_zemtsov.92@mail.ru

Жукова Ольга Петровна

канд. техн. наук, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 82, тел.: +7 (391) 227-86-19, e-mail: zhukovolga@yandex.ru

Nikolay A. Voinov

Dr.Sci.(Eng.), Professor of the Department of Machine, Apparatus Industrial Technologies, Siberian State Aerospace University, 82, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia, phone: +7 (391) 227-86-19, e-mail: voynov@siberianet.ru

Denis A. Zemtsov

postgraduate Student of the Department of Machine, Apparatus Industrial Technologies, Siberian State Aerospace University, 82, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia, phone: +7 (391) 227-86-19, e-mail: denis_zemtsov.92@mail.ru

Olga P. Zhukova

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Machine, Apparatus Industrial Technologies, Siberian State Aerospace University, 82, Mira Ave., Krasnoyarsk, 660049, Russia, phone: +7 (391) 227-86-19, e-mail: zhukovolga@yandex.ru

