

УДК66.048.3.069.833

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.31.4.022](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.022)

Разработка и численное моделирование конструкции колонны для контактирования газа с жидкостью

А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, С.А. Фоменков

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»,
Волгоград, Российская Федерация*

Резюме: Разработана конструкция колонны для контактирования газа или пара с жидкостью, которая позволяет повысить производительность за счет усовершенствования поверхности контакта фаз. Известные ранее и разработанные в последнее время конструкции массообменных колонн, не отвечают требованиям по достижению необходимого технического результата. Это происходит из-за малой площади создания поверхности контакта фаз, что приводит к недостаточному массопереносу на поверхности слоя жидкости, образуемого между элементами тарелок колонны, что снижает производительность. Поэтому предлагается провести осесимметричную кольцевую многорядную установку S-образных элементов с вертикальной перегородкой по окружности с одинаковым зазором между смежными кольцами, что позволит увеличить площадь поверхности контакта фаз между стекающей жидкостью и поднимающимся вверх газом (паром), и будет способствовать интенсификации тепло- и массообменных процессов, приведет к увеличению производительности. Для подтверждения заявляемого технического результата, проведены сравнительные расчеты на ЭВМ по разработанной программе, с известными конструкциями тарелок с туннельными колпачками типа ТСТ для колонных аппаратов диаметром (400-3000 мм). Было проведено моделирование разработанной конструкции колонны для контактирования и ранее известные стандартные колонны с колпачковыми тарелками. Численное моделирование показало, что установка S-образных элементов с вертикальными перегородками по окружности, осесимметрично с одинаковым зазором между смежными кольцами, в зазорах между которыми равномерно расположены переливные устройства, представляющие собой трубки с разбрызгивающим устройством, позволяют увеличить площадь поверхности контакта фаз между стекающей жидкостью и поднимающимся вверх паром на 65%, а также позволяет обеспечивать повышенную скорость тепло- и массопереноса на тарелке.

Ключевые слова: массообменные колонны, контактные устройства, численное моделирование, тарелки, тарелки с S-образными элементами.

Для цитирования: Голованчиков А.Б. Прохоренко Н.А., Фоменков С.А. Разработка и численное моделирование конструкции колонны для контактирования газа с жидкостью. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2020;8(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=868> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.022

Development and numerical modeling of the column structure for gas - liquid contact

A.B. Golovanchikov, N.A. Prokhorenko, S.A. Fomenkov

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Volgograd State Technical University"
Volgograd, Russian Federation*

Abstract: The design of a column for contacting gas or vapor with a liquid has been developed, which allows increasing productivity by improving the surface of contact between phases. Previously known and recently developed designs of mass transfer columns do not meet the requirements for achieving the required technical result. This is due to the small area of creation of the phase contact surface, which leads to insufficient mass transfer on the surface of the liquid layer formed between the elements of the column trays, which reduces productivity. Therefore, it is proposed to carry out an axisymmetric annular multi-row installation of S-shaped elements with a vertical partition around the circumference with the same gap between adjacent rings, which will increase the surface area of the phase contact between the flowing liquid and the rising gas (vapor), and will contribute to the intensification of heat and mass transfer processes, will increase performance. To confirm the claimed technical result, comparative calculations were carried out on a computer according to the developed program, with known designs of plates with tunnel caps of the TST type for column apparatus with a diameter of (400-3000 mm). The design of the contacting column developed and the previously known standard bubble cap trays were simulated. Numerical modeling showed that the installation of S-shaped elements with vertical partitions around the circumference, axisymmetrically with the same gap between adjacent rings, in the gaps between which the overflow devices, which are tubes with a spray device, are evenly located, make it possible to increase the surface area of the phase contact between the flowing liquid and rising steam by 65%, and also allows to provide an increased rate of heat and mass transfer on the tray.

Keywords: mass transfer columns, contact devices, numerical modeling, trays, trays with S-shaped elements.

For citation: Golovanchikov A.B. Prokhorenko N.A. Fomenkov S.A. Development and numerical modeling of the structure of the column for contacting gas with liquids. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=868> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.022 (In Russ).

Введение

Массообменные колонны имеют сложную конструкцию, высокую металлоемкость и повышенное потребление энергии в виде греющих и охлаждающих агентов. Расход энергии в значительной мере зависит от совершенства аппаратного оформления, т.е. эффективности используемых контактных устройств в колоннах. Из теории массообменных процессов известно, что чем ниже эффективность контактных устройств, например, в процессах ректификации, тем требуется больший расход флегмы и, следовательно, повышается расход греющего агента в кипятильнике колонны и охлаждающего в дефлегматоре (на примере, ректификации)[1-3].

Существуют несколько основных способов увеличения производительности тепло- массообменных тарельчатых колонн. В основном эти способы основаны на увеличении локальной и средней движущей силы за счет изменения давления и температуры материальных потоков и на интенсификации самих тепло- и массообменных процессов за счет вибрации, пульсации, вращения, перемешивания, турбулизации и т.п. [4-5].

Почему-то в меньшей степени обращается внимание на увеличение поверхности тепло- массопередачи за счет более полного использования рабочей поверхности тарелки и установки на ней контактных устройств, а также создания условий для тепло- массообменных процессов между тарелками.

Целью работы является разработка конструкции и численное моделирование колонны с туннельными колпачками, обеспечивающей повышение площади массопередачи жидкой и паровой (газовой) фазы за счет увеличения поверхности их контакта при барботаже паровых пузырьков в слой жидкости на тарелке и капель жидкости в объеме парового пространства между тарелками.

Разработанная перспективная конструкция колонны для контактирования газа (пара) с жидкостью, может найти применение в химической, нефтехимической, газовой, пищевой, фармацевтической, энергетической и других отраслях промышленности[6].

Разработанное техническое решение

На Рисунке 1 изображен общий вид в разрезе колонны для контактирования газа (пара) с жидкостью, на Рисунке 2 представлен вид сверху схемы конструкции тарелки, с кольцевыми S-образными туннельными колпачками и патрубками для слива жидкой фазы и ее разбрызгивания между тарелками.

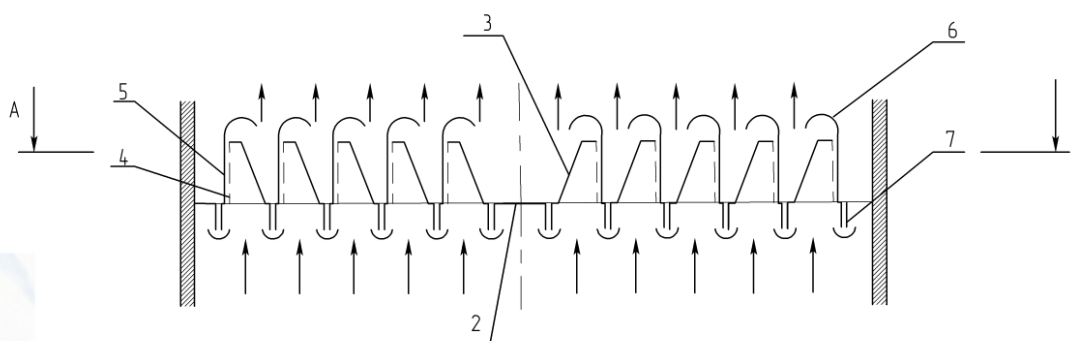


Рисунок 1 - Общий вид в разрезе колонны для контактирования газа (пара) с жидкостью

Figure 1 - General sectional view of the column for contacting gas (vapor) with liquid

Колонна для контактирования газа с жидкостью содержит корпус 1, тарелки 2, состоящие из кольцевых S-образных элементов с одной глухой стенкой 3 и одной перфорированной вертикальной стенкой 4, вертикальных перегородок 5 с отбойным козырьком 6 и переливных устройств 7, представляющих собой трубки с разбрызгивающими устройствами в нижней части под тарелкой. S-образные элементы установлены по окружности. Таких окружностей, образованных S-образными элементами, может быть несколько на тарелке (на Рисунок 1 и 2 показан пример колонны с пятью окружностями, образованными S-образными элементами), при этом данные окружности, образованные S-образными элементами, расположены осесимметрично с одинаковым зазором между смежными окружностями с S-образными элементами, в котором равномерно расположены переливные устройства 7, представляющие собой трубки. S-образные элементы и вертикальные перегородки 5 с помощью специальных пластин (на Рисунок 1 не показаны) соединяются между собой и образуют полотно тарелки 2. При этом исключается необходимость в каркасе для крепления элементов тарелки 2. Газовая (паровая) фаза проходит по каналам, образованным глухой стенкой 3 и перфорированной вертикальной стенкой 4, установленные по окружности. После прохождения канала, газ (пар) попадает в каналы, образованный перфорированными вертикальными стенками 4 S-образных элементов, установленные по окружности. После чего газ (пар) попадает в жидкость, находящуюся в каналах, образующихся между перфорированной вертикальной стенкой 4 и вертикальными перегородками 5, установленные по окружности. Образованная газо(паро)-жидкостная эмульсия (пена), отбрасывается отбойными козырьками 6 к переливному устройству 7 в канал.

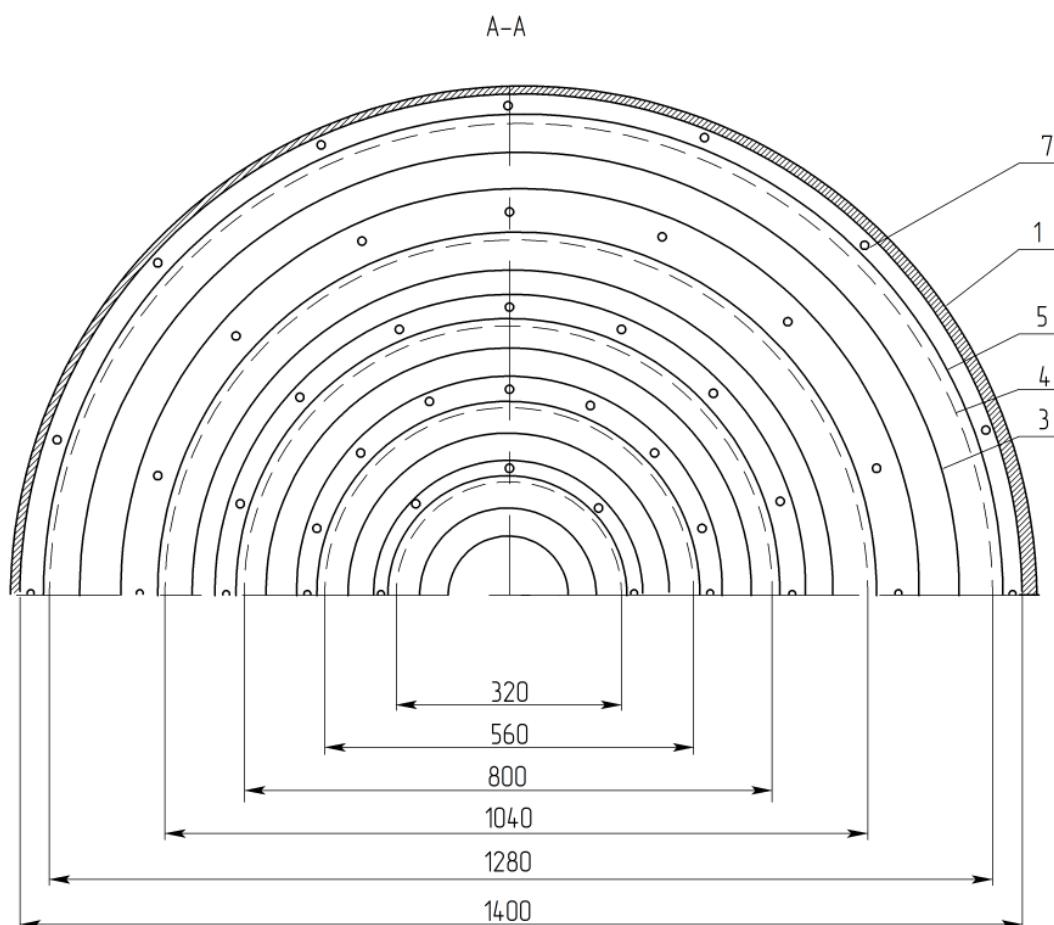


Рисунок 2 - Вид сверху предлагаемой конструкции тарелки для контактирования газа с жидкостью

Figure 2 - Top view of the proposed design of the tray for contacting gas with liquid

Принцип действия разработанной конструкции

Колонна для контактирования газа с жидкостью работает следующим образом. Газовая (паровая) фаза поступает с нижележащей тарелки 2 или из куба колонны под тарелку 2 в каналы, образованные глухой стенкой 3 и перфорированной вертикальной стенкой 4 двух соседних S-образных элементов. Затем газ идет в канал и барботирует через отверстия в перфорированных вертикальных стенках 4 S-образных элементов в жидкость, находящуюся в каналах В между перфорированной вертикальной стенкой 4 и вертикальными перегородками 5. При этом образуется газо(паро)-жидкостная эмульсия (пена), имеющая меньший удельный вес, чем жидкость, стекающая с вышележащей тарелки 2 или поступившая из соседнего канала В тарелки 2. За счет меньшего удельного веса газо (паро)-жидкостная эмульсия, имеющая развитую поверхность контакта, поднимается вверх по каналу В (происходит явление газлифта). Таким образом, осуществляется контакт между газом (паром) и жидкостью. Затем газо(паро)-жидкостная смесь отбрасывается по направлению к переливным устройствам – трубкам 7 отбойными козырьками 6 в канал, где происходит отделение газа (пара) от жидкости. Далее процесс повторяется до перелива жидкости с вышележащей тарелки 2 на нижележащую через трубки 7, причем общее сечение всех трубок должно равняться площади сечения

перфорированной переливной трубы в тепловых конструкциях беспровальных тарельчатых колонн.

При увеличении количества газа (пара), поднимающегося вверх по колонне, давление под тарелкой 2 в канале над жидкостью увеличивается, поэтому уровень жидкости в канале понижается и через большее количество отверстий в перфорированной вертикальной стенке 4 S-образного элемента начинается барботаж газа с жидкостью. При уменьшении количества поднимающегося газа (пара) по колонне уровень жидкости в канале вновь повышается, и часть отверстий для прохода газа (пара) в перфорированной вертикальной стенке 4 закрывается жидкостью.

Жидкость, поступающая на тарелку 2 колонны с вышележащей тарелки 2, движется по направлению к переливным устройствам - трубкам 7, причем перемешивание жидкости на тарелке 2 исключается в связи с установкой вертикальных перегородок 5 с отбойными козырьками 6.

Результаты расчетов

Предоставляем пример, подтверждающий повышение производительности за счет увеличения поверхности контакта фаз.

Сравнение приводится с конструкцией тарелок с туннельными колпачками типа ТСТ для колонных аппаратов диаметром (400-3000 мм) [7-8]. Выбираем тарелку для колонного аппарата диаметром $D=1400$ мм. Длина линии барботажа газовой или паровой фазы $L_6=15,2$ м, но эта тарелка с двухсторонним барботажем через каждый туннельный колпачок.

Для одностороннего барботажа через туннельные колпачки, эта длина составит $L_6=7,6$ м. На Рисунок 1 и Рисунок 2 в масштабе 1:10 представлены эскизы конструкции тарелки с туннельными колпачками кольцевого типа. Ширина каждого кольцевого колпачка оставлена такой же, как и у колпачков типа ТСТ, установленных в ряд $b_0=80$ мм, а расстояние между их кольцевыми осями в предполагаемой конструкции увеличено с b_0 с 30 мм до 40 мм, чтобы сделать отверстия 7 для установки патрубков слива жидкости и капельного орошения в межтарельчатом пространстве поднимающейся сплошной газовой (паровой) фазы. Но даже в этом случае как видно из представленных эскизов, число кольцевых туннельных колпачков равно 5. Общая длина линий барботажа газовой (паровой) фазы, которая обозначена кольцевыми пунктирными линиями 4, составит:

$$L_{o\bar{o}} = 3,14(0,32 + 0,56 + 0,8 + 1,04 + 1,28) = 12,56 \text{ м},$$

против $L_0=7,6$ м в типовой туннельной тарелке ТСТ, в которой туннели расположены в ряд, параллельно друг с другом. При одинаковой высоте прорезей в перфорированной вертикальной стенке в известной тарелке с туннельными колпачками, установленными в ряд параллельно друг с другом и в предлагаемой конструкции с кольцевыми туннельными колпачками отношение площадей барботажных прорезей в перфорированной односторонней вертикальной стенкой будет равно отношению длин этих стенок:

$$\frac{F_{o\bar{o}}}{F_0} = \frac{L_{o\bar{o}} \cdot h}{L_0 \cdot h} = \frac{L_{o\bar{o}}}{L_0}, \quad (1)$$

где h – высота барботажных прорезей.

Производительность колонны определяется по уравнению материального баланса:

$$G = \frac{\Delta M_y}{y_n - y_k}, \quad (2)$$

где G – производительность по газовой (паровой) фазе, кгG/c;

ΔM_y - количество распределяемого вещества перешедшего из одной фазы в другую в единицу времени, кг A/c;

y_n, y_k - соответственно концентрации распределяемого вещества A в газовой (паровой) фазе на входе и выходе, кгA/кгG.

Количество распределяемого вещества, переходящего из одной фазы в другую в единицу времени, определяется из уравнения массопередачи:

$$\Delta M_y = k_y F_y \Delta y_{cp}, \quad (3)$$

где k_y – поверхностный коэффициент массопередачи по газовой (паровой) фазе;

Δy_{cp} - средняя движущая сила по газовой (паровой) фазе, кгA/кгG.

Тогда из совместного решения уравнений (2) и (3) получаем уравнение для производительности:

$$G = \left[\frac{k_y \Delta y_{cp}}{y_n - y_k} \right] F_y. \quad (4)$$

При одинаковых значениях параметров, стоящих в квадратных скобках, отношение производительностей заявляемыми туннельными кольцевыми колпачками с типовыми туннельными колпачками, установленными параллельно в ряд будет прямо пропорционально отношению длин линий барботажа:

$$\frac{F_{об}}{F_0} = \frac{G_{об}}{G_0},$$

или с учетом выражения (1):

$$\frac{F_{об}}{F_0} = \frac{G_{об}}{G_0} = \frac{12,56}{7,6} = 1,65 \quad (5)$$

То есть производительность за счет увеличения поверхности барботажа в перфорированных кольцевых вертикальных стенках по сравнению с перфорированными вертикальными стенками туннельных колпачков ТСТ, установленных параллельно в ряд, возрастает на 56%.

В объеме, занимаемом газовой или паровой фазой между тарелками в предлагаемой конструкции происходит дополнительная массопередача на поверхности раздела фаз капель жидкой фазы, стекающей по трубкам 7 переливных устройств. Этот процесс аналогичен массопереносу в пустотелых колоннах с капельным орошением [9-10]. Здесь идет массоперенос от сплошной газовой (паровой) фазы к поверхности капель. уравнение массопердачи будет иметь вид:

$$\Delta M_x = k_x F_x \Delta x_{cp}, \quad (6)$$

где ΔM_x - количество поглощенного каплями распределяемого вещества из паровой (газовой) фазы в жидкость, кгA/кгL;

Δx_{cp} - средняя движущая сила по жидкой фазе, кгA/м²с.

Из общего уравнения материального баланса для абсорбционных колонн:

$$L(x_k - x_n) = G(y_n - y_k),$$

где L – расход жидкой фазы, кгL/c;

x_n, x_k - соответственно концентрации распределяемого компонента А в жидкой фазе на входе и выходе, кгА/кгL;
 следует, что показанное выше возможное увеличение производительности по газовой (паровой) фазе G потребует увеличение производительности по жидкой фазе L (в противном случае рабочая линия процесса массопередачи может пересечь равновесную линию).

Производительность по жидкой фазе из уравнения массопередачи:

$$L = \frac{\Delta M_x}{x_k - x_n}, \quad (7)$$

Тогда из совместного решения уравнений (6) и (7) получаем производительность по жидкой фазе:

$$L = \frac{k_x F_x \Delta x_{cp}}{x_k - x_n}, \quad (8)$$

где k_x – поверхностный коэффициент массопередачи по жидкой фазе, кгА/м²с;
 F_x – площадь поверхности массопередачи капель жидкости, м²;

Δx_{cp} - средняя движущая сила по жидкой фазе капель, кгА/кгL.

Массопередача в каплях жидкости происходит в межтарельчатом объеме, обеспечивая возможность увеличения расхода жидкой фазы L вслед за увеличением расхода газовой фазы G за счет увеличения поверхности барботажных газовой (паровой) пузырьков в кольцевых перфорированных стенках 4.

В работе [2, стр. 395] приводится пример расчета тарельчатой ректификационной колонны для бинарной смеси «бензол-толуол».

Средняя плотность пара $\rho_d = 2,91 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, кипящего раствора $\rho_w = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Расход пара $G_d = 4050 \frac{\text{кг}}{\text{час}}$, кипящего раствора $G_w = 5950 \frac{\text{кг}}{\text{час}}$.

Объемная производительность:

по пару $q_d = \frac{G_d}{\rho_d} = 1400 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$, по жидкости $q_w = \frac{G_w}{\rho_w} = 7,44 \frac{\text{м}^3}{\text{час}}$.

При размере пузырьков в 10 раз больше размера капель, поверхность капель составляет 5,3 % от поверхности пузырьков. При среднем диаметре пузырьков пара d_d выходящих из колпачков, производительность по пузырькам составит:

$$N_d = \frac{6q_d}{\pi d_d^3}, \quad (9)$$

то же при диаметре капель жидкости d_w , выходящих из трубок 7 с разбрызгивающими каплями, производительность по каплям составит:

$$N_w = \frac{6q_w}{\pi d_w^3}, \quad (10)$$

Тогда производительность по поверхности пузырьков пара:

$$f_d = N_d \pi d_d^2,$$

или с учетом формулы (9):

$$f_d = 6 \frac{q_d}{d_d}, \quad (11)$$

производительность по поверхности капель с учетом формулы (10):

$$f_w = 6 \frac{q_w}{d_w}. \quad (12)$$

Тогда отклонение поверхности капель к поверхности пузырьков пара:

$$\frac{f_w}{f_d} = \frac{\frac{q_w}{d_w}}{\frac{q_d}{d_d}},$$

и при условии соответствия размера пузырьков капель $d_d = 10d_w$ ($d_d = 10$ мм, $d_w = 1$ мм) получаем:

$$\frac{f_w}{f_d} = \frac{q_w \cdot 10}{q_d} = \frac{7,44 \cdot 10}{1400} = 0,053$$

Поэтому установка S-образных элементов с вертикальной перегородкой по окружности, осесимметрично с одинаковым зазором между смежными окружностями с S-образными элементами, позволяет увеличить площадь поверхности контакта фаз между стекающей жидкостью и поднимающимся вверх газом (паром), и будет способствовать интенсификации тепло- и массообменных процессов, что приведет к увеличению производительности. Также выполнение переливных устройств в виде трубок, равномерно расположенных по окружности в зазоре между смежными окружностями с установленными S-образными элементами, позволяет равномерно орошать нижестоящую тарелку, что будет способствовать интенсификации и повышает производительность тарельчатой и массообменной колонны.

Вместо одной переливной трубы $D_T=200$ мм равномерно по площади тарелки в кольцевых зазорах между туннельными колпачками необходимо установить 45 переливных трубок с разбрызгивающими устройствами, при этом внутренний диаметр каждой трубки должен равняться 30 мм[11].

Заключение

Проведенное численное моделирование разработанной конструкции колонны для контактирования, а также сравнение полученных результатов исследования с ранее известными стандартными массообменными колоннами с колпачковыми тарелками в процессах ректификации показало, что данная модернизация позволяет увеличить площадь поверхности контакта фаз между стекающей жидкостью и поднимающимся вверх паром на 65%, а также позволяет обеспечивать повышенную скорость тепло- и массопереноса на тарелке. Таким образом, установка S-образных элементов с вертикальной перегородкой по окружности, осесимметрично с одинаковым зазором между смежными окружностями с S-образными элементами, в котором равномерно расположены переливные устройства, представляющие собой трубки с капельными оросителями, позволяет увеличить площадь поверхности контакта фаз между стекающей жидкостью и поднимающимся вверх паром. Такая искусственно созданная инверсия фаз, которая на тарелках дисперсной фазой является пар (газ) и сплошной – жидкость, а в межтрубном пространстве дисперсной фазой становятся капли жидкости, а сплошной пар (газ), повышает скорость тепло- и массопереноса на тарелке, а значит увеличивает время работы колонны и ее производительность в целом.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. ИД «Химия». 1974.
2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов. ИД «Альянс». 2005.
3. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. ИД «Химия». 1987.
4. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры, ИД «Москва». 1963.
5. Сокол Б.А., Чернышов А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. ИД «Инфохим» 2009.
6. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. ИД «Химия». 1969.
7. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. ИД «Химия». 1968.
8. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. ИД «Химия». 1982.
9. Голованчиков А. Б., Карев В.Н., Прохоренко Н.А. Simulation of Rectification Process Taking into Account Longitudinal Diffusion on Equations of Working Lines. *Springer Nature Switzerland AG, ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020;1(1):441-449.
10. Жуков В. П., Беляков А.Н. Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных модулей уравнения Больцмана. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*. 2017;51(1):78-84.
11. Скобло А.И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности /А.И. Скобло, И.А. Трогубовой, Ю.К. Молоканов.М. : Химия, 1982:584.

REFERENCES

1. Bagaturov S.A. Fundamentals of theory and calculation of distillation and rectification. Publishing House "Chemistry". 1974.
2. Pavlov KF, Romankov PG, Noskov AA Examples and tasks for the course of processes and apparatuses of chemical technology: textbook. manual for universities. Publishing House "Alliance". 2005.
3. Planovsky A.N., Nikolaev P.I. Processes and devices of chemical and petrochemical technology. Publishing House "Chemistry". 1987.
4. Lashchinsky A.A., Tolchinsky A.R. Fundamentals of design and calculation of chemical equipment, Publishing House "Moscow". 1963.
5. Sokol B.A., Chernyshov A.K., Baranov D.A. Mass transfer column packing. Publishing House Infohim 2009.
6. Levenshpil O. Engineering registration of chemical processes. Publishing House "Chemistry". 1969.
7. Kafarov V.V. Cybernetics methods in chemistry and chemical technology. Publishing House "Chemistry". 1968.
8. Zakgeym A.Yu. Introduction to the modeling of chemical engineering processes. Publishing House "Chemistry". 1982.
9. Golovanchikov A.B., Karev V.N., Prokhorenko N.A. Simulation of Rectification Process

- Taking into Account Longitudinal Diffusion on Equations of Working Lines. *Springer Nature Switzerland AG, ser. : Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020;1(1):441-449.
10. Zhukov V. P., Belyakov A. N. Simulation of combined heterogeneous processes based on discrete modules of the Boltzmann equation. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*. 2017;51(1):78-84.
11. Skoblo A. I. Processes and apparatuses of the oil refining and petrochemical industry /A.I. Skoblo, I.A. Trogubovoya, Y.K. Molokanov. - М.: Khimiya, 1982:584.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Прохоренко Наталья Андреевна, аспирант, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет", Волгоград, Российская Федерация.
e-mail: natasha292009@yandex.ru
ORCID: [0000-0002-5706-1475](https://orcid.org/0000-0002-5706-1475)

Natalya A. Prokhorenko, PhD Student, Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

Голованчиков Александр Борисович, д-р. тех. наук, профессор, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет", Волгоград, Российская Федерация.
e-mail: natasha292009@yandex.ru
ORCID: [0000-0002-4576-4229](https://orcid.org/0000-0002-4576-4229)

Alexander B. Golovanchikov, Dr. those. Sci., Professor, Department of Processes and Apparatus for Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

Фоменков Сергей Алексеевич, д-р. тех. наук, профессор, кафедра «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования», ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет", Волгоград, Российская Федерация.
e-mail: saf@vstu.ru
ORCID: [0000-0001-9907-4488](https://orcid.org/0000-0001-9907-4488)

Sergey A. Fomenkov, Dr. those. Sci., Professor, Department of computer-aided design and search engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation