

Н. Д. Минченков (магистрант), С. К. Чуракова (д.т.н., проф.)

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КПД ПРЯМОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ МАССОПЕРЕДАЧИ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра «Нефтехимия и химическая технология»
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов 1, e-mail: nminch02@mail.ru

N. D. Minchenkov, S. K. Churakova

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE EFFICIENCY OF DIRECT-FLOW CONTACT DEVICES ON THE PARAMETERS OF THE MASS TRANSFER EQUATION

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; email: nminch02@mail.ru

Одним из типов контактных устройств с точки зрения организации взаимного движения фаз являются прямоточные контактные устройства, известны различные варианты их аппаратной реализации. В представленной работе для установления зависимости КПД прямоточных контактных устройств от параметров уравнения массопередачи, параметров технологического процесса и расходов взаимодействующих фаз использован подход, примененный ранее к перекрестноточным тарельчатым контактными устройствам. Данный подход основан на совместном интегрировании основного уравнения массопередачи в дифференциальной форме, уравнений материального баланса и рабочей линии прямоточного контактного устройства. Принято допущение, что движение фаз близко к модели идеального вытеснения, равновесные и диффузионные характеристики в пределах контактного устройства постоянны, а связь равновесных концентраций в фазах является линейной. В результате получены выражения для КПД прямоточного контактного устройства по обоим фазам. Полученные зависимости сопоставлены с уравнениями, связывающими КПД перекрестноточных тарельчатых контактных устройств с теми же параметрами.

Ключевые слова: время контактирования; контактирование фаз; контактные устройства; КПД по Мерффи; массообменная эффективность; межфазная поверхность; основное уравнение массопередачи; параметры массопередачи; прямоточные контактные устройства; равновесная концентрация; режим вытеснения; уравнение рабочей линии

One of the types of contact devices from the point of view of the organization of the mutual movement of phases are direct-flow contact devices, various variants of their hardware implementation are known. In the presented work, to establish the dependence of the efficiency of direct-flow contact devices on the parameters of the mass transfer equation, the parameters of the technological process and the costs of the interacting phases, an approach previously applied to cross-flow plate contact devices was used. This approach is based on the joint integration of the basic equation of mass transfer in differential form, the equations of material balance and the operation line of a direct-flow contact device. It is assumed that the movement of the phases is close to the model of ideal displacement, the equilibrium and diffusion characteristics within the contact device are constant, and the relationship of equilibrium concentrations in the phases is linear. As a result, expressions are obtained for the efficiency of a direct-flow contact device in both phases. The obtained dependences are compared with the equations relating the efficiency of cross-flow plate contact devices with the same parameters.

Key words: basic mass transfer equation; contact devices; direct-flow contact devices; displacement mode; equation of the operation line; equilibrium concentration; interfacial surface; mass transfer efficiency; mass transfer parameters; Murphy efficiency; phase contouring; time of contouring

Дата поступления 25.11.25

Массообменная эффективность контактных устройств, наряду с создаваемым ими перепадом давления, производительностью, энергосбережением и т.д.¹, является одним из показателей, характеризующих их эффективность и применимость в аппаратном оформлении конкретного технологического процесса. Массообменная эффективность обычно характеризуется КПД, однако для описания эффективности противоточных насадок, как правило, используется значение высоты, эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ)².

Оценка массообменной эффективности контактного устройства является сложной задачей, поскольку данная величина зависит от большого количества параметров, точный учет которых зачастую невозможен. На протекание массообменного процесса оказывают влияние как физические свойства отдельных компонентов и фаз в целом², так и особенности движения потоков газа и жидкости, а именно режим течения, равномерность распределения газа по сечению аппарата³, продольная диффузия по высоте аппарата⁴, перемешивание жидкости⁵ и т.д. Указывается также на зависимость КПД массообменных устройств от создаваемого ими перепада давления⁶. Это объясняется тем, что создаваемый контактным устройством перепад давления складывается из составляющих, некоторые из которых связаны с передачей энергии и импульса между потоками фаз, а это явление способно интенсифицировать процессы тепло- и массообмена. Очевидно также влияние температуры и давления системы на протекание массообменного процесса и эффективность контактного устройства, так как эти параметры определяют равновесные и диффузионные свойства компонентов. Однако в целом можно сказать, что наибольшее влияние на эффективность контактного устройства оказывает его конструкция и способ организации взаимного движения фаз, так как этот параметр контактного устройства сочетает в себе многие влияющие параметры, перечисленные ранее.

Известны эмпирические зависимости, позволяющие определить КПД тарельчатых^{7,8} и ВЭТТ насадочных⁹ контактных устройств. Достоинством данных зависимостей является их простота и возможность приближенной оценки эффективности контактного устройства, даже если не известны многие данные о его работе. Недостатки же связаны с тем, что в этих формулах, зачастую, не учитываются особенности конструкции и параметры протекания массообменного процесса, что становится причиной низкой точности прогнозирования. Также недостатком использования эмпирических формул является трудность анализа на-

блюдаемых закономерностей. К тому же часто эмпирические зависимости для ВЭТТ применимы лишь к какому-то одному типу насадок², что затрудняет экстраполяцию этих зависимостей на другие типы устройств. В целом же большая часть известных эмпирических выражений, позволяющих оценить эффективность массообменного устройства, относится к тарельчатым или противоточным насадочным контактным устройствам. Однако еще одним классом устройств, встречающимся в технологической практике, являются прямоточные контактные устройства, достоинством которых является высокая производительность, не ограниченная, в отличие от противоточных контактных устройств, режимом захлебывания, в сочетании с относительно не большим перепадом давления. Известны конструкции полых^{10,11}, струйных¹², роторных¹³ прямоточных контактных устройств, при этом многие из них создают локальный прямоток фаз, работая при общем противотоке по аппарату. Разнообразие конструкций массообменных устройств и аппаратов, работающих в режиме прямотка фаз, говорит о целесообразности изучения их массообменной эффективности и установления зависимости их КПД от влияющих параметров. В работе¹⁴ с использованием уравнений массопередачи в дифференциальной форме и уравнений материального баланса получены выражения КПД по Мерффри по обеим фазам для перекрестноточных тарельчатых контактных устройств. Целесообразно применить данный подход также к прямоточным контактным устройствам.

Материалы и методы

Основное уравнение массопередачи в интегральной форме устанавливает связь массы вещества M , переданного через поверхность F за время τ при движущей силе Δc :

$$M = K \cdot \Delta c \cdot F \cdot \tau, \quad (1)$$

где K – коэффициент массопередачи.

Данная форма уравнения массопередачи может быть использована непосредственно для расчета массы перераспределенного компонента лишь при постоянном значении движущей силы. Однако движущая сила может изменяться в различных точках массообменного устройства, при этом опытные наблюдения свидетельствуют также о влиянии времени контактирования (пребывания) фаз на эффективность массообменного устройства¹⁵. Для изучения влияния изменения движущей силы массообменного процесса и времени контактирования в работе¹⁴ было предложено

но использовать уравнения массопередачи для каждой из фаз в дифференциальной форме:

$$dM = K \cdot (y^* - y) \cdot dF \cdot d\tau, \quad (2)$$

$$dM = K \cdot (x - x^*) \cdot dF \cdot d\tau. \quad (3)$$

Рассмотрим схему прямоточного контактного устройства (рис. 1):

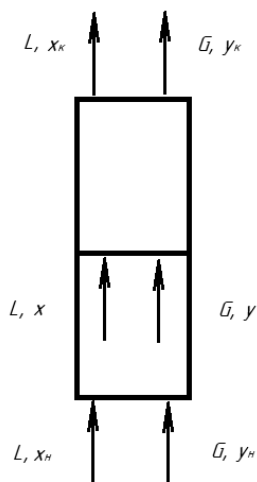


Рис. 1. Прямоточное контактное устройство

Будем считать, что перераспределяемый компонент переходит из фазы L (начальная концентрация x_n , конечная x_k) в фазу G (начальная концентрация y_n , конечная y_k). Примем также, что фазы движутся в режиме идеального вытеснения, то есть продольного перемешивания нет, и изменение концентрации компонента в них происходит только за счет массообмена с другой фазой.

Рассмотрим материальный баланс процесса массопередачи по фазе G . Бесконечно малое приращение массы компонента в ней за счет изменения его концентрации равно бесконечно малому приращению по уравнению массопередачи (2):

$$Gdy = K \cdot (y^* - y) \cdot dF \cdot d\tau, \quad (4)$$

При этом материальный баланс по произвольному поперечному сечению контактного устройства выражается уравнением:

$$G \cdot y + L \cdot x = G \cdot y_k + L \cdot x_k, \quad (5)$$

Из формулы (5) могут быть получены выражения, связывающие неравновесные концентрации компонента в потоках двух фаз, то есть, уравнения рабочей линии прямоточного контактного устройства:

$$y = y_k + \frac{L}{G}(x_k - x), \quad (6)$$

$$x = x_k + \frac{G}{L}(y_k - y). \quad (7)$$

Допуская линейную связь равновесных концентраций $y^* = k_i x$, подставляя правую часть выражения (7), умноженную на константу фазового равновесия k_i , в формулу (4) в качестве y^* и разделяя переменные, получаем:

$$\frac{G}{K} \int_{y_n}^{y_k} \frac{dy}{k_i x_k + \frac{Gk_i}{L} y_k - \left(\frac{Gk_i}{L} + 1 \right) y} = \int_0^F dF \int_0^\tau d\tau. \quad (8)$$

С учетом того, что пределы интегрирования по F и τ являются константами, находится следующее решение данного дифференциального уравнения:

$$\frac{G}{K} \cdot \left(-\frac{L}{Gk_i + L} \right) \cdot \ln \frac{(k_i x_k - y_k)}{k_i x_k + \frac{Gk_i}{L}(y_k - y_n) - y_n} = F\tau. \quad (9)$$

Перегруппируем множители, проведем операцию потенцирования и найдем обратное выражение:

$$\frac{k_i x_k + \frac{Gk_i}{L}(y_k - y_n) - y_n}{k_i x_k - y_k} = \exp \left[\frac{KF\tau(Gk_i + L)}{GL} \right]. \quad (10)$$

Вычитание единицы из обеих частей выражения (10) и последующее возведение полученного равенства в (-1) степень с перегруппировкой множителей дает следующий результат:

$$\frac{Gk_i + L}{L \cdot \exp \left[\frac{KF\tau(Gk_i + L)}{GL} \right] - L} = \frac{k_i x_k - y_k}{y_k - y_n}. \quad (11)$$

КПД по Мерффи для фазы G описывается следующим соотношением:

$$E_y = \frac{y_k - y_n}{y^* - y_n}. \quad (12)$$

Прибавление единицы к обеим частям уравнения (11) с учетом того, что $y^* = k_i x_k$, и уравнения (12) с последующим нахождением обратного выражения дает формулу для КПД по Мерффи по фазе G для прямоточного контактного устройства:

$$E_y = \frac{L \cdot \exp \left[\frac{KF\tau(Gk_i + L)}{GL} \right] - L}{L \cdot \exp \left[\frac{KF\tau(Gk_i + L)}{GL} \right] + Gk_i}. \quad (13)$$

Зависимость КПД по Мерффи для фазы L может быть получена посредством аналогичных преобразований. Однако в этом случае необходимо учесть, что бесконечно малое приращение массы компонента в пределах фазы равно $dM = -Ldx$, поскольку концентрация перераспределяемого компонента в ней убывает. Уравнение массопередачи описывается выражением (3), равновесная концентрация x^* при этом вычисляется как $x^* = y/k_i$, и

уравнение рабочей линии должно быть выражено через y (6). В результате может быть получено равенство, связывающее КПД по Мерффри по фазе L с параметрами уравнения массопередачи, расходами фаз и, косвенно, параметрами технологического процесса:

$$E_x = \frac{Gk_i \cdot \exp\left[\frac{KF\tau(Gk_i + L)}{LGk_i}\right] - Gk_i}{Gk_i \cdot \exp\left[\frac{KF\tau(Gk_i + L)}{LGk_i}\right] + L} \quad (14)$$

где E_x равно:

$$E_y = \frac{x_n - x_k}{x_n - x^*} \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение

Полученные в данной работе формулы (13) и (14) для КПД прямооточного контактного устройства по Мерффри по обеим фазам связывают данный показатель эффективности с различными факторами, влияющими на протекание массообменного процесса. Влияние площади межфазной поверхности и времени контактирования фаз следует из уравнения массопередачи, влияние же расходов обеих фаз на массообменную эффективность сказывается за счет того, что отношение их расходов представляет собой тангенс угла наклона рабочей линии, от положения которой зависит изменение движущей силы процесса. Влияние индивидуальных диффузионных свойств компонента и фаз на процесс оказывается через коэффициент массопередачи. Индивидуальность равновесных характеристик сказывается за счет константы фазового равновесия, которая также фигурирует в выражениях (13) и (14). Влияние же параметров системы, то есть температуры и давления, выражается косвенно через коэффициент массопередачи и константу фазового равновесия. Учет этих параметров отличает полученные формулы от эмпирических выражений, которые зачастую являются излишне упрощенными и не учитывают многие факторы, что может стать причиной снижения точности прогнозирования. Однако необходимо еще раз подчеркнуть, что полученные зависимости также базируются на некоторых допущениях: движение фаз в режиме идеального вытеснения, постоянство константы фазового равновесия, коэффициента массопередачи и расходов фаз в пределах контактного устройства, линейная связь равновесных концентраций.

Выражения (13) и (14) для КПД прямооточного контактного устройства отличаются от уравне-

ний, описывающих КПД перекрестноточных тарельчатых контактных устройств по обеим фазам¹⁴, что объясняется существенным различием моделей движения и взаимного направления потоков.

Из формул (13) и (14) следует, что КПД по Мерффри прямооточного контактного устройства для каждой из фаз всегда меньше 1, так как показатели экспонент положительны, а числитель в обоих случаях меньше знаменателя на величину суммы $(Gk_i + L)$. При бесконечной площади поверхности контакта фаз и времени их контактирования КПД по обеим фазам стремится к 1:

$$\lim_{F \rightarrow \infty} E_y = \lim_{\tau \rightarrow \infty} E_y = 1; \\ \lim_{F \rightarrow \infty} E_x = \lim_{\tau \rightarrow \infty} E_x = 1.$$

В этом заключается еще одно существенное отличие прямооточного контактного устройства от перекрестноточных тарельчатых контактных устройств¹⁴, связанное с организацией взаимного движения фаз. КПД по газовой фазе (если речь идет о процессах с участием паровой и жидкой фаз, таких, как ректификация и физическая абсорбция) для перекрестноточного тарельчатого контактного устройства при бесконечном площади поверхности контакта фаз и (или) времени их контактирования стремится к 1. А КПД по идеально перемешанной жидкой фазе, описываемый формулой (16)¹⁴:

$$E_x = \frac{Gk_i \left(1 - \exp\left[-\frac{KF\tau}{Gk_i}\right]\right)}{Gk_i \left(1 - \exp\left[-\frac{KF\tau}{Gk_i}\right]\right) + L} \quad (16)$$

при $F \rightarrow \infty$ и (или) $\tau \rightarrow \infty$ равен:

$$\lim_{F \rightarrow \infty} E_x = \lim_{\tau \rightarrow \infty} E_x = \frac{Gk_i}{Gk_i + L}.$$

Данный предел меньше 1 и приближается к 1 в том случае, когда произведение расхода газовой фазы на константу фазового равновесия существенно больше расхода жидкости. Это можно объяснить тем, что полностью перемешанная жидкость на полотно тарелки всегда, даже непосредственно перед покиданием контактного устройства, контактирует не только с покидающим контактное устройство, но и со свежим потоком пара, поступающим на данное контактное устройство, а, значит, равновесная концентрация компонента в жидкости, которая определяет движущую силу массообмена, рассчитывается относительно начальной концентрации данного компонента в паре. В этом случае оказывается, что общее содержание перераспределяемого компонента в паровом потоке не достаточно для того, чтобы довести

концентрацию этого же компонента в жидкости до равновесного значения, а значит, КПД по жидкости даже при бесконечно долгом контактировании и бесконечно большой площади межфазной поверхности будет меньше 1.

В то же время для прямоточного контактного устройства равновесная концентрация и, соответственно, движущая сила, представляющая собой разность текущей и равновесной концентраций, рассчитывается относительно конечной концентрации во втором потоке, поскольку оба потока движутся односторонне и перед покиданием контактного устройства один выходящий поток взаимодействует с другим выходящим потоком. Следовательно, вне зависимости от расходов фаз, концентрации в них при их контактировании могут достичь равновесного значения, и КПД может стремиться к 1.

Несмотря на данное отличие, общность подходов в определении КПД разных типов контак-

тных устройств заключается в том, что равновесная концентрация компонента в потоке, для которого рассчитывается КПД, определяется на основании того, с каким потоком второй фазы – свежим или покидающим контактное устройство – взаимодействует данный поток на выходе из контактного устройства. И в зависимости от этого расчет КПД ведется с использованием равновесной концентрации относительно начальной или конечной концентрации компонента во второй фазе.

Таким образом, КПД различен не только для разных типов контактных устройств, но и для каждого режима работы одного контактного устройства и каждого компонента разделяемой многокомпонентной системы. Изучение закономерностей массообменной эффективности контактных устройств позволяет повысить надежность разработки и модернизации массообменного оборудования.

Литература

1. Чуракова С.К., Нестеров И.Д., Богатых К.Ф. Техничко-эксплуатационные характеристики вакуумных колонн, оборудованных регулярными насадками различных типов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2013. – №4. – С.51-56.
2. Полянский А.В., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Кравчик Я. Оценка эффективности насадочных массообменных устройств // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – Т.51, №3. – С.330-337.
3. Долгова А.Н., Лаптева Е.А. Определение эффективности массообменных тарелок колонных аппаратов с учетом неравномерности распределения фаз // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2013. – №6. – С.283-309.
4. Голованчиков А.Б., Карев В.Н., Прохоренко Н.А. Моделирование процесса ректификации с учетом продольной диффузии на уравнения рабочих линий // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2019. – Т.7, №2. – С.41-46.
5. Самойлов Н.А., Мнушкин И.А., Мнушкина О.А. Границы реализации совмещенных реакционно-ректификационных процессов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2009. – Т.52, №12. – С.97-102.
6. Беляевский М.Ю., Колмогоров Г.Ю., Заика А.И., Беляевский Д.М., Бабарыкин Н.М. Определение гидравлического сопротивления эффективности массообменных тарелок // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2014. – №1. – С.42-47.
7. Quan Y., Mosca G., Roza M. Characteristics of trays using inertial separation technology // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2010. – V.18. – №6. – Pp.954-961.
8. Елизаров Д.В., Елизаров В.В., Мерзляков С.А. Выбор оптимальных конструктивных параметров седельных и клапанных тарелок ректификационных аппаратов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16, №12. – С.187-190.

References

1. Churakova S.K., Nesterov I.D., Bogatykh K.F. *Tekhniko-ekspluatatsionnye kharakteristiki vakuumnykh kolonn, oborudovannykh regul'yarnymi nasadkami razlichnykh tipov* [Technical and operational characteristics of vacuum columns equipped with regular packing of various types]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoy opyt* [Oil Refining and Petrochemicals: Scientific and Technical Achievements and Best Practices], 2013, no. 4, pp. 51-56.
2. Polyanski A.V., Blinichev V.N., Chagin O.V., Kravchik Y. [Estimation of the efficiency of packed mass-transfer devices]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol.51, no.3, pp.341-347.
3. Dolgova A.N., Lapteva E.A. *Opredelenie effektivnosti massoobmennyykh tarelok kolonnykh apparatov s uchetom neravnomernosti raspredeleniya faz* [Determination of the efficiency of mass transfer plates of column apparatuses, taking into account the uneven phase distribution]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftgazovoe delo* [Electronic scientific journal Oil and Gas Business], 2013, no.6, pp.283-309.
4. Golovanchikov A.B., Karev V.N., Prokhorenko N.A. *Modelirovanie protsessa rektifikatsii s uchetom prodolnoy diffuzii na uravneniya rabochikh liniy* [Modeling of the rectification process taking into account longitudinal diffusion on the equations of working lines]. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: An Online Electronic Scientific Journal], 2019, vol.7, no.2, pp.41-46.
5. Samoilov N.A., Mnushkin I.A., Mnushkina O.A. *Granitsy realizatsii sovmeshchennykh reaktsionno-rektifikatsionnykh protsessov* [The boundaries of the implementation of combined reaction-rectification processes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2009, vol.52, no.12, pp.97-102.
6. Beliaevskiy M.Yu., Kolmogorov G.Yu., Zaika A.I., Beliaevskiy D.M., Babarykin N.M. *Opredelenie gidravlicheskogo soprotivleniya i effektivnosti*

9. Wang G. Q., Yuan X. G., Yu K. T. Review of mass-transfer correlations for packed columns // *Industrial & engineering chemistry research*.– 2005.– Т.44, №23.– С.8715-8729.
10. Wilkinson P. et.al. Distillation trays that operate beyond the limits of gravity by using centrifugal separation // *Chemical Engineering Research and Design*.– 2007.– V.85, №1.– Pp.130-135.
11. Patent USA №9895629. Contact and separation column and tray / P.M. Wilkinson, J. Kuppen, E. J. Vos // 2018.
12. Патент на полезную модель №235231 РФ. Скруббер-абсорбер Вентури / Ф.С. Югай, М.В. Иванова, К.А. Фадеев // Оpubл. 25.06.2025.
13. А. с. №1556705 СССР. Роторный массообменный аппарат / В.Н. Мамин, И.Н. Рывкин // Оpubл. 15.04.1990.
14. Минченков Н.Д., Чуракова С.К., Ибрагимов И.Г., Иванов С.П. Аналитическое определение зависимости КПД перекрестноточных тарельчатых контактных устройств от параметров уравнения массо-передачи // *Баш. хим. ж.*– 2025.– Т.32, №3.– С.95-100.
15. Полянский А.В., Блиничев В.Н., Чагин О.В. Критерии оценки эффективности работы ректификационных колонн // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология.*– 2016.– Т.59, №1.– С.3-8.
7. Quan Y., Mosca G., Roza M. [Characteristics of trays using inertial separation technology]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, vol.18, no.6, pp.954-961.
8. Elizarov D.V., Elizarov V.V., Merzlyakov S.A. *Vybor optimalnykh konstruktivnykh parametrov sitchatykh i klapannykh tarelok rektifikatsionnykh apparatov* [Selection of optimal design parameters of strainer and valve plates of rectification devices]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2013, vol.16, no.12, pp.187-190.
9. Wang G. Q., Yuan X. G., Yu K. T. [Review of mass-transfer correlations for packed columns]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2005, vol.44, no.23, pp.8715-8729.
10. Wilkinson P.M. et.al. [Distillation trays that operate beyond the limits of gravity by using centrifugal separation]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, vol.85, no.1, pp.130-135.
11. Wilkinson P.M., Kuppen J., Vos E.J. [Contact and separation column and tray]. Patent USA no.9895629, 2018.
12. Yugai F.S., Ivanova M.V., Fadeev K.A. *Skrubber-absorber Venturi* [Venturi Scrubber Absorber]. Patent RF no. 235231, 2025.
13. Mamin V.N., Ryvkin I.N. *Rotornyi massoobmennyy apparat* [Rotary mass transfer machine]. Copyright certificate of the USSR, no. 1556705, 1990.
14. Minchenkov N.D., Churakova S.K., Ibragimov I.G., Ivanov S.P. *Analiticheskoe opredelenie zavisimosti KPD perekrestnotochnykh tarel'chatykh kontaktnykh ustroystv ot parametrov uravneniia massoperedachi* [Analytical determination of the dependence of the efficiency of cross-flow plate contact devices on the parameters of the mass transfer equation]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2025, vol.32, no.3, pp.95-100.
15. Polianskii A.V., Blinichev V.N., Chagin O.V. *Kriterii otsenki effektivnosti raboty rektifikatsionnykh kolonn* [Criteria for evaluating the efficiency of distillation columns]. *zvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2016, vol.59, no.1, pp.3-8.