

К. А. Муллабаев (асп.), С. К. Чуракова (д.т.н., проф.), А. Р. Валеев (асп.)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗ В НАСАДОЧНЫХ ЭКСТРАКТОРАХ СРЕДСТВАМИ CFD-СИСТЕМ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра нефтехимии и химической технологии
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: kamil200995@gmail.com

K. A. Mullabaev, S. K. Churakova, A. R. Valeev

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ASSESSING THE UNIFORMITY OF PHASE DISTRIBUTION IN PACKED EXTRACTORS USING CFD SYSTEMS

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: kamil200995@gmail.com

Рассмотрены некоторые варианты конструкций перераспределителей жидкости в насадочных экстракторах, а также методы оценки эффективности распределения фаз. Показано, что на текущий момент информация по расчетным методам оценки распределения потоков практически отсутствует. В связи с этим разработан и предложен ряд методов оценки равномерности распределения сплошной и дисперсной фаз в экстракционных колоннах средствами CFD-систем, позволяющий выполнить сравнительный анализ эффективности различных вариантов перераспределительных устройств, а также провести оптимизацию конструктивных решений.

Ключевые слова: CFD-анализ; доля обратного тока; оптимизация; отверстие; перераспределительная тарелка; проектирование; распределение потоков; стакан; функция эффективности распределения; экстракционная колонна.

Обеспечение равномерности распределения потоков в экстракторах колонного типа является одним из основных факторов, предопределяющих эффективность дальнейшего контакта фаз друг с другом ¹. Равномерное распределение потоков по всему сечению аппарата способствует увеличению эффективной площади контакта взаимодействующих фаз, а также выравниванию среднего времени пребывания локальных струй. Особенно сильное влияние эффективности изначального распределения наблюдается в противоточных насадочных экстракторах с достаточно большой вы-

Some design options for liquid redistributors in packed extractors are considered, as well as methods for evaluating the efficiency of phase distribution. It is shown that now there is practically no information on the calculation methods for estimating the distribution of flows. In this regard, a number of methods have been developed and proposed for evaluating the uniformity of the distribution of continuous and dispersed phases in extraction columns by means of CFD-systems, which allows to perform a comparative analysis of the effectiveness of various options for redistribution devices, as well as to optimize design solutions.

Key words: backflow fraction, CFD-analysis, design, distribution efficiency function, extraction column, flow distribution, hole, optimization, overflow pipe, redistribution plate.

сотой насадочных слоев, где зачастую могут возникать пристеночные эффекты.

Наиболее распространенными типами внутренних устройств, предназначенными для распределения сплошной и дисперсной фаз по сечению аппарата, являются перераспределительные тарелки ². В зависимости от типа применяемой насадки, диаметра аппарата, а также соотношения плотностей сплошной и дисперсной фаз, конструктивное оформление перераспределительных тарелок может существенно отличаться. На рис. 1 представлена одна из возможных конфигураций перераспределителей жидкости, предназначенных для диспергирования тяжелой фазы ³. Более

Дата поступления 18.12.21

легкая сплошная фаза движется вверх, проходя через стаканы на тарелке. Капли тяжелой дисперсной фазы, двигаясь вниз, образуют над плотным тарелки слой, и далее проходят вниз через отверстия на полотне, равномерно распределяясь под полотном перед насадкой.

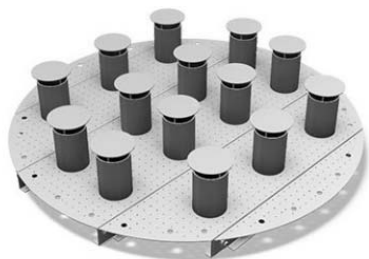


Рис. 1. Перераспределитель жидкости для диспергирования тяжелой фазы компании Koch-Glitsch

Нужно отметить, что на некоторых моделях перераспределителей жидкости присутствует шляпка над стаканом. В некоторых случаях также можно наблюдать переточные стаканы, частично выходящие под полотно тарелки. Сравнительный анализ и выбор наиболее оптимальной конструкции среди столь большого множества вариантов является трудоемкой, но необходимой задачей.

До недавнего времени единственным методом оценки распределения потоков являлся метод, основанный на построении функции отклика, который позволял определить распределение времени пребывания локальных струй в аппарате⁴. Суть этих методов состоит в введении в ядро потока специального вещества-индикатора, концентрацию которого определяют на выходе из аппарата различными методами⁵. Основной недостаток такого метода – необходимость проведения серий экспериментов с компонентами модельной системы. Кроме того, поскольку метод предусматривает ввод трассера, то возникает необходимость в его своевременном удалении из модельных компонентов.

С нарастанием вычислительных мощностей и развитием вычислительной гидродинамики методы CFD-анализа все чаще применяются при изучении движения жидкостей и газов в аппаратах химической промышленности, дополняя существовавшие ранее эмпирические методы. Тем не менее, на данный момент информация по расчетным методам оценки распределения потоков практически отсутствует. В практических задачах при исследовании равномерности распределения потоков зачастую ограничиваются лишь иллюстрациями с полями скоростей, получаемыми в визуализаторе после проведения гидродинамического расчета в CFD-среде. Среди методов численной оценки равномерности распределения можно

выделить метод, основанный на вычислении коэффициента неравномерности распределения, вычисляемый по формуле⁶:

$$M_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i - U_0}{U_0} \right)^2}$$

где U_i – скорость потока в i -ой ячейке расчетной области в рассматриваемом сечении S ;

U_0 – поверхностная скорость потока;

n – общее число ячеек.

Идеальному распределению соответствует $M_f = 0$, а абсолютно хаотичному $M_f = +\infty$ (такое возможно при интенсивном перемешивании потока внутри аппарата при минимальной фиктивной скорости). Такой разброс значений функции M_f не очень удобен в плане представления результатов. Кроме того, данная величина не имеет физического смысла, а является лишь статистической функцией.

Целью исследования является создание методики оценки эффективности распределения фаз в насадочных экстракционных колоннах средствами CFD-анализа, позволяющая рационально оценить эффективность работы перераспределительного устройства.

Методология расчетного исследования

Изучение эффективности распределения жидкостей на перераспределительных тарелках осуществлялось при помощи методов CFD-анализа, а также с применением CAD-систем⁷. В программе SolidWorks были построены 3D-модели перераспределительных тарелок с различными конфигурациями (рис. 2).

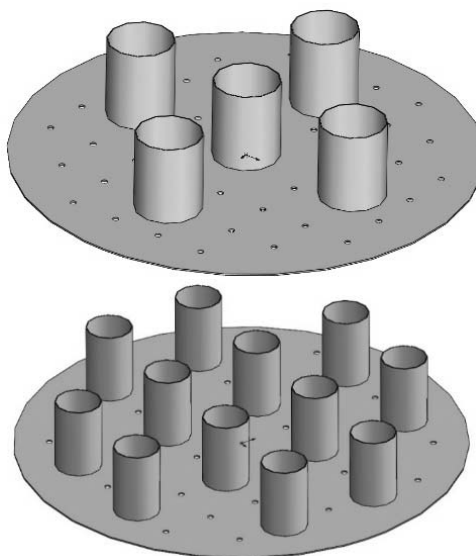


Рис. 2. Некоторые конфигурации перераспределительных тарелок (12 стаканов и 5 стаканов)

Расчет проводился в среде *ANSYS CFX* в стационарной постановке. Основные расчетные параметры модели представлены в работе ⁷. В качестве результатов численного моделирования были получены данные о скорости потоков сплошной и дисперсной фаз в каждой точке расчетной области.

Метод оценки равномерности распределения сплошной фазы основывался на следующих положениях:

- идеальное распределение соответствует такому гипотетическому гидродинамическому состоянию Р, при котором величина вектора скорости сплошной фазы $U_c(x, y, z)$ в каждой точке одинакова. Для рассматриваемого поперечного сечения аппарата $S_{xy}(z)$ можно рассматривать равенство векторов Z-составляющей скорости $U_z(x, y)$ (аксиальная составляющая, возникающая при движении потока снизу вверх).

- неравномерность распределения скорости движения потока $U_z(x, y)$ приводит к возникновению обратных токов. Доля обратного тока через заданное сечение аппарата $S_{xy}(z)$ по отношению к прямому току (*backflow fraction, BFF*) характеризует неравномерность распределения потока в выбранном сечении аппарата.

Зная значение Z-составляющей скорости $U_z(x, y)$ в каждой точке рассматриваемого сечения S_{xy} , результирующее значение потока вещества через сечение S_{xy} определяется как двойной интеграл Z-составляющей скорости $U_z(x, y)$ по поверхности S_{xy} :

$$\bar{M} = \iint_{S_{xy}} \rho U_z dS.$$

Применительно к процессам жидкостной экстракции в докритической области жидкости можно считать несжимающимися, т.е. $\rho(x, y, z, t) = \text{const}$:

$$\bar{M} = \rho \iint_{S_{xy}} U_z dS.$$

Результирующий расход через сечение является разностью потоков, движущихся в прямом и обратном направлении относительно основной части потока:

$$\bar{M} = M_{front} - M_{back}.$$

Гипотетическое изменение обратного тока на прямой соответствует новому полю скоростей $|U_z|(x, y)$. Для такого гипотетического поля результирующий поток определяется следующим образом:

$$M_{hyp} = \rho \iint_{S_{xy}} |U_z| dS = M_{front} + M_{back}.$$

Сопоставив величины $\bar{M}$ и M_{hyp} и взяв их полуразность, можно определить величину обратного тока M_{back} :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(M_{hyp} - \bar{M}) &= \frac{1}{2}[(M_{front} + M_{back}) - (M_{front} - M_{back})] = \\ &= M_{back} = \frac{1}{2} \rho \left(\iint_{S_{xy}} |U_z| dS - \iint_{S_{xy}} U_z dS \right). \end{aligned}$$

Долю обратного тока предлагается определить относительно гипотетического потока M_{hyp} , а не результирующего $\bar{M}$, поскольку последний может принимать нулевые и отрицательные значения (при $M_{back} > M_{front}$). При данном подходе значение *BFF* находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, величина *BFF* определяется как

$$BFF = \frac{\rho \left(\iint_{S_{xy}} |U_z| dS - \iint_{S_{xy}} U_z dS \right)}{2 \rho \iint_{S_{xy}} |U_z| dS} = \frac{\iint_{S_{xy}} |U_z| dS - \iint_{S_{xy}} U_z dS}{2 \iint_{S_{xy}} |U_z| dS}.$$

Наряду с величиной *BFF* для оценки равномерности распределения потоков предлагается усовершенствовать существующую функцию неравномерности распределения M_f , упомянутую ранее. Сначала вычисляется среднее значение Z-составляющей скорости $\bar{U}_z$ в сечении S_{xy} :

$$\bar{U}_z = \frac{1}{n} \sum_{S_{xy}} U_z$$

Далее вычисляется среднеквадратическое отклонение и относительное отклонение σ_U или коэффициент вариации величины скорости u_U :

$$\begin{aligned} \sigma_U &= \sqrt{\frac{1}{n} (U_z - \bar{U}_z)^2}; \\ u_U &= \frac{\sigma_U}{|\bar{U}_z|}. \end{aligned}$$

Коэффициент вариации u_U является полным аналогом функции неравномерности распределения M_f и также может принимать значения $[0; +\infty)$.

Предлагается ввести функцию эффективности распределения Φ , которая удовлетворяет следующим условиям:

- 1) $\Phi = 0$ при $v = +\infty$ (хаотичное распределение);
- 2) $\Phi = 1$ при $v = 0$ (идеальное распределение);
- 3) $\partial \Phi / \partial v < 0 \quad \forall \quad v \in [0; +\infty)$.

Наиболее подходящей оказалась обратная функция вида:

$$\Phi(v) = \frac{1}{1+v}.$$

Пограничное значение $\Phi(v)=0.5$ функция принимает при $v=1$. Значения функции $\Phi(v) > 0.5$ отвечают приемлемому распределению, а $\Phi(v) < 0.5$ – неравномерному распределению.

Для сплошной фазы функция эффективности распределения запишется в виде:

$$\Phi(v_U) = \frac{1}{1+v_U}.$$

Распределение капель дисперсной фазы предлагается оценивать аналогичным способом исходя из среднеквадратичного отклонения величины объемной доли дисперсной фазы σ_φ как показано в работе ⁸. Обладая расчетными данными об объемной доле дисперсной фазы в каждой точке расчетной области, среднеквадратичное отклонение σ_φ можно вычислить по формуле:

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{1}{S_{XY}} \iint_{S_{XY}} (\varphi - \bar{\varphi})^2 dS};$$

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{S_{XY}} \iint_{S_{XY}} \varphi dS.$$

где φ – значение объемной доли дисперсной фазы в данной точке рассматриваемого сечения S_{XY} ;

$\bar{\varphi}$ – среднее значение объемной доли дисперсной фазы в сечении S_{XY} .

Функция эффективности распределения для капель дисперсной фазы $\Phi(v_\varphi)$ запишется в виде:

$$\Phi(v_\varphi) = \frac{1}{1+v_\varphi}, \quad \text{где} \quad v_\varphi = \sigma_\varphi / \bar{\varphi}.$$

Для сравнительной оценки эффективности распределения потоков в *CFD*-среде просчитаются поля скоростей фаз и объемной доли дисперсной фазы. Далее высчитываются % обратного тока сплошной фазы *BFF*, а также функции эффективности распределения $\Phi(v_U)$ и $\Phi(v_\varphi)$. Меньшие значения величин *BFF* и большие значения $\Phi(v_U)$ и $\Phi(v_\varphi)$ соответствуют лучшему распределению сплошной и дисперсной фаз в аппарате.

Обсуждение результатов

На рис. 3 представлены векторные поля скоростей сплошной фазы для перераспределительных устройств с 12 и 5 стаканами (3D-модели устройств показаны на рис. 2).

В табл. 1 представлены основные конструктивные размеры перераспределительных тарелок, а также показатели эффективности распределения фаз для соответствующих внутренних устройств.

Как видно из табл. 1, при использовании для распределения фаз тарелки с 5 стаканами, обратное перемешивание под тарелкой снижается (доля обратного тока ниже на 7.7% по сравнению с использованием тарелки с 12 стаканами). Также растут функции эффективности распределения, как для сплошной, так и для дисперсной фаз, что делает вариант тарелки с 5 стаканами более эффективным. Нужно отметить, что представленные выше результаты относятся лишь к двум конструкциям, показанным на рис. 2, и не могут быть использованы в качестве рекомендаций для проектирования. Для разработки комплекса технических решений по проектированию перераспределительных устройств необходимо провести оптимизацию конструктива. Данный этап подразумевает расчет ряда перераспределителей с различной геометрией при различных жидкостных нагрузках, вычисление функций эффективности распределения $\Phi(v_U)$ и $\Phi(v_\varphi)$ и % обратного тока сплошной фазы *BFF* для каждой просчитанной геометрии и выбор наиболее оптимальной конструкции на основе полученных результатов.

Таким образом, в результате проведенного исследования были предложены численные методы оценки равномерности распределения сплошной и дисперсной фаз в аппарате методами *CFD*-анализа, включающие в себя вышеописанные функции, которые позволяют выполнить сравнительный анализ эффективности различных вариантов перераспределительных устройств, а также провести оптимизацию конструктивных решений. Это позволит наиболее рационально спроектировать перераспределители, обеспечивающие максимальную эффективность контакта фаз, что увеличит эффективность аппарата в целом.

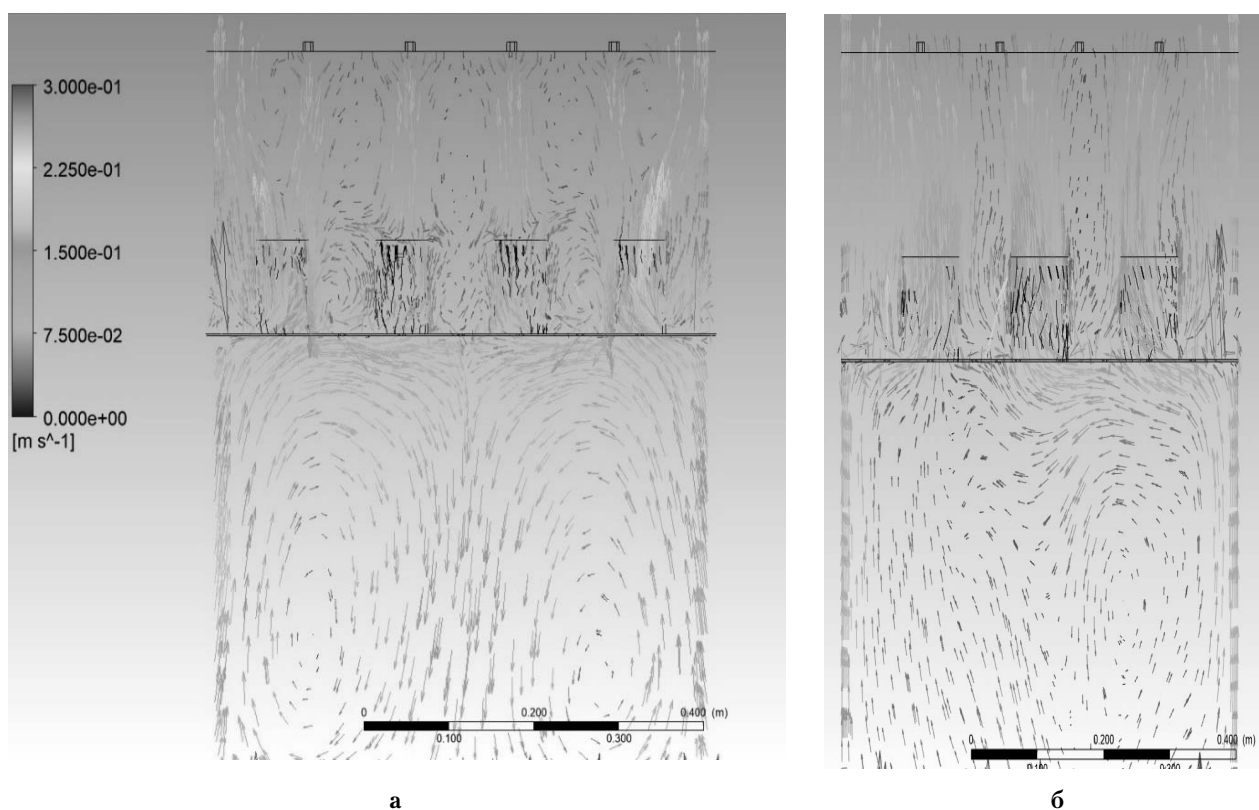


Рис. 3. Векторные поля скоростей сплошной фазы (сплошная фаза движется снизу вверх): а – перераспределитель с 12 стаканами; б – перераспределитель с 5 стаканами

Таблица 1

Основные конструктивные размеры перераспределительных тарелок и показатели эффективности распределения фаз

Показатель	Тарелка с 12 стаканами	Тарелка с 5 стаканами
Конструктивные параметры:		
Диаметр тарелки D , мм	600	600
Диаметр отверстий d_o , мм	8	8
Число отверстий N_o	33	40
Диаметр стаканов d_c , мм	60	85
Число стаканов N_c	12	5
Высота стакана над полотном h_c , мм	100	100
Расчетные скорости сплошной и дисперсной фаз:		
Скорость дисперсной фазы в отверстиях ω_o , м/с	0.22	0.18
Скорость сплошной фазы в стаканах ω_c , м/с	0.08	0.10
Показатели распределения фаз:		
BFF для сплошной фазы (300 мм под полотном)	0.446	0.369
BFF для сплошной фазы (200 мм над полотном)	0.403	0.401
$\Phi(v_L)$ для сплошной фазы (300 мм под полотном)	0.09	0.19
$\Phi(v_L)$ для сплошной фазы (200 мм над полотном)	0.13	0.14
$\Phi(v_L)$ для дисперсной фазы (300 мм под полотном)	0.52	0.56

Литература

1. Леонтьев В.С. Инновации в области разработки высокоинтенсивных массообменных устройств для модернизации ректификационных комплексов // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №1. – С.178-186.
2. Чуракова С.К. Классификация контактных устройств с точки зрения организации контакта фаз // Баш. хим. ж. – 2011. – Т.18, №2. – С.39-44.
3. Koch-Glitsch. Liquid distributors (metal) [Электронный ресурс]: каталог внутренних устройств колонного оборудования. – Электрон. данные. – Режим доступа: <https://koch-glitsch.com/products/packing-and-internals?productcategory=packing-and-internals&categoryname=m-Liquid-Distributors>. (доступ 30.11.2021).
4. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. – Л.: Химия, 1975. – 319 с.
5. Самойлов Н.А. Моделирование в химической технологии и расчет реакторов. – Уфа: изд-во УГНТУ, 2005. – 224 с.
6. Haghshenasfard M., Zivdar M., Rahimi R., Esfahany M.N. CFD Simulation of Gas Distribution Performance of Gas Inlet Systems in Packed Columns // Chemical Engineering & Technology. – 2007. – V.30, №9. – Pp.1176-1180.
7. Захарова Д.Н., Вильданов Ф.Ш., Ахметов Р.Ф., Рахимов Т.Х., Чуракова С.К. CFD-анализ ситчатой тарелки // Баш. хим. ж. – 2019. – Т.26, №2. – С.121-126.
8. Nielsen R.B., Rogers J., Bullin J.A., Duewall K.J. Treat LPGs with Amines // Proc. of 74th Annual GPA Convention «Design Consideration for Sweetening LPG's with Amines». – 1995. – Pp.49-59.

References

1. Leont'ev V.S. *Innovatsii v oblasti razrabotki vysokointensivnykh massoobmennyykh ustroystv dlya modernizatsii rektifikatsionnykh kompleksov* [Innovations in the field of development high-intensity mass-transfer devices for retrofit of rectifying complexes], *Elektronnyi zhurnal «Neftegazovoe delo»* [Electronic Journal Oil and Gas Business], 2012, no.1, pp.178-186.
2. Churakova S.K. *Klassifikatsiya kontaktnykh ustroystv s tochki zreniya organizatsii kontakta faz* [Classification of contacting devices from the point of view of the organization of contact of phases]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2011, vol.18, no.2, pp.39-44.
3. Koch-Glitsch. Liquid distributors (metal). Column equipment internals. Available at: <https://koch-glitsch.com/products/packing-and-internals?productcategory=packing-and-internals&categoryname=m-Liquid-Distributors>. (accessed 30.11.2021).
4. Aleksandrov I.A. *Massoperedacha pri rektifikatsii i absorptsii mnogokomponentnykh smesey* [Mass transfer in rectification and absorption of multicomponent mixtures]. Leningrad, Khimiya Publ., 1975, 319 p.
5. Samoylov N.A. *Modelirovanie v khimicheskoi tekhnologii i raschet reaktorov* [Chemical Modeling and Reactor Design]. Ufa, USPTU Publ., 2005, 224 p.
6. Haghshenasfard M., Zivdar M., Rahimi R., Esfahany M.N. [CFD Simulation of Gas Distribution Performance of Gas Inlet Systems in Packed Columns]. *Chemical Engineering & Technology*, 2007, vol.30, no.9, pp.1176-1180.
7. Zakharova D.N., Vildanov F.Sh., Akhmetov R.F., Rakhimov T.Kh., Churakova S.K. *CFD-analiz sitchatoi tarelki* [Sieve Tray CFD Analysis]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2019, vol.26, no.2, pp.121-126.
8. Nielsen R.B., Rogers J., Bullin J.A., Duewall K.J. [Treat LPGs with Amines]. Proc. of 74th Annual GPA Convention «Design Consideration for Sweetening LPG's with Amines», 1995, pp.49-59.