

К. А. Муллабаев (к.т.н., рук. гр.)¹, С. К. Чуракова (д.т.н., проф.)^{2а}, Г. М. Сидоров (д.т.н., проф.)^{2б}

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В ЭКСТРАКЦИОННЫХ АППАРАТАХ

¹ ООО «НИПИ НГ «ПЕТОН»

450071, г. Уфа, пр. Салавата Юлаева, 58; e-mail: kamil200995@gmail.com

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,

^а кафедра «Нефтехимия и химическая технология», ^б кафедра «Технология нефти и газа»
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов 1

K. A. Mullabaev¹, S. K. Churakova², G. M. Sidorov²

COMPUTATIONAL STUDY OF DISPERSED PHASE DISTRIBUTORS HYDRODYNAMICS IN EXTRACTION DEVICES

¹ SRDI OIL & GAS PETON; 58, Pr. Salavata Yulaeva Str., 450071, Ufa, Russia; email: kamil200995@gmail.com

² Ufa State Petroleum Technological University; 1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia

Представлены результаты CFD-моделирования распределителей дисперсной фазы в среде ANSYS FLUENT применительно к системам «жидкость–жидкость». Исследовано влияние скорости истечения дисперсной фазы и размеров боковых трубок распределителей на равномерность распределения дисперсной фазы. Определено требуемое соотношение поперечного сечения боковых трубок и сечения всех отверстий в ней, достаточное для обеспечения эффективного распределения дисперсной фазы. Определен диапазон эффективной работы трубчатых распределителей дисперсной фазы при рекомендованных параметрах конструкции.

Ключевые слова: диапазон нагрузок; моделирование; отверстие; распределитель дисперсной фазы; трубка; экстракция; эффективность распределения

Для достижения высокой эффективности протекающего массообменного процесса в колонном аппарате большое значение имеет обеспечение равномерного распределения взаимодействующих фаз. Как известно, в процессах жидкостной экстракции коэффициенты массопередачи, как правило ниже, чем в процессах ректификации и абсорбции. Ввиду этого, при одной и той же высоте массообменной колонны в процессах взаимодействия в системах «газ–жидкость» или «жидкость–пар» удастся достичь большего числа теоретических ступеней разделения, чем в процессах взаимодействия в системах «жидкость–жидкость». Как известно, ВЭТТ (высота, эквивалентная теоретической тарелке) промышленных насадочных рек-

The article presents the results of CFD-modeling of dispersed phase distributors in ANSYS FLUENT relating to liquid-liquid systems. The influence of the dispersed phase flow rate and the size of the distributor side tubes on the dispersed phase distribution uniformity is investigated. The required ratio of the cross-section of the side tubes and the cross-section of all orifices in it, sufficient to ensure effective dispersed phase distribution, is determined. The range of effective operation of tubular dispersed phase distributors with recommended design parameters is determined.

Key words: disperse phase distributor; distribution efficiency load range; extraction; orifice; simulation; tube

тификационных колонн составляет 0.2–0.8 м¹, а ВЭТТ промышленных экстракционных колонн – до 2 м и более². В связи с этим, влияние эффективности распределения потоков на эффективность процесса жидкостной экстракции в целом оказывается более существенным, чем влияние на эффективность процессов ректификации и абсорбции.

Для эффективного потока дисперсной фазы, вводимого в экстракционный аппарат, чаще всего применяются высоконапорные распределители, типовая конструкция которого представлена на рис. 1.

В настоящее время в литературе приведены некоторые рекомендации по проектированию трубчатых распределителей дисперсной фазы, в частности, выбор диаметра отверстий³ и максимально допустимой скорости истечения дисперсной фазы⁴.

Дата поступления 23.09.25

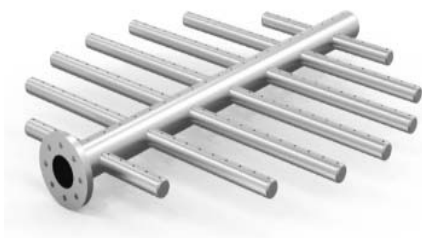


Рис. 1. Высоконапорный распределитель жидкости

Тем не менее, информация по конструктивным и технологическим условиям для обеспечения эффективной работы данных типов устройств весьма ограничена. В этой связи были поставлены следующие задачи исследования:

- определение требуемых диаметров боковых распределительных трубок, при которых обеспечивается эффективное распределение потока жидкой фазы при ее истечении в другую жидкую фазу;
- определение диапазонов работы распределителей дисперсной фазы, при которой достигается эффективное распределение потока.

Материалы и методы

В данной работе исследовались гидродинамика процесса распределения потока жидкости в боковых трубках распределителей дисперсной фазы методами численного моделирования. Некоторые 3D-модели боковых трубок исследуемых распределителей приведены на рис. 2. Характеристики исследуемых трубок распределителей приведены в табл. 1.

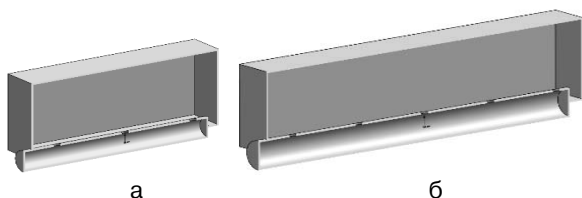


Рис. 2. 3D-модели боковых трубок исследуемых распределителей: а – боковая трубка с 3 отверстиями; б – боковая трубка с 5 отверстиями

Гидродинамический расчет боковых трубок распределителей был выполнен в среде ANSYS FLUENT в динамическом режиме с применением метода Volume of Fluid (VOF). Расчетное исследование проводилось на системе «вода–трансформаторное масло», где моделировалось

истечение более легкой фазы масла из отверстий в неподвижную водную фазу. Основные параметры CFD-модели приведены в работе ⁵. Подача фазы масла соответствовала средним скоростям истечения из отверстий 0.1–0.4 м/с, при этом переход из капельного режима истечения в струйный соответствовал расчетной скорости истечения из отверстий 0.137 м/с. Таким образом, нижняя граница скорости соответствует капельному режиму истечения, а верхняя допустимая граница скорости – развитому струйному режиму ⁴.

Эффективность распределения оценивалась на основе данных о расходе потоков через каждое отверстие распределителя:

$$\Phi = \frac{\min(\overline{M_j})}{\max(\overline{M_j})}$$

где $\overline{M_j}$ – средний расход потока через j -ое отверстие трубки, кг/с.

Чем ближе значение Φ к 1, тем выше эффективность распределения. Под достаточно эффективным распределением потока принято распределение, соответствующее значениям $\Phi \geq 0.90$.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе было исследовано влияние подачи дисперсной фазы, а также размеров боковых трубок распределителей на эффективность распределения дисперсной фазы. На рис. 3 приведена зависимость показателя Φ от скорости потока дисперсной фазы в отверстиях при различном соотношении диаметров трубок и отверстий d_T/d_o для трубок с 3 отверстиями:

Можно видеть, что с увеличением подачи жидкости растет и эффективность распределения, при этом в развитом струйном режиме увеличение диаметра боковых трубок также способствует улучшению равномерности распределения потока. Также можно видеть, что в области подач дисперсной фазы, соответствующих переходу из капельного режима истечения в струйный, равномерность распределения дисперсной фазы снижается.

На втором этапе исследования были определены такие соотношения диаметров боковых трубок и диаметров отверстий в этих трубках d_T/d_o , при которых значение показателя эффективности

Таблица 1
Основные характеристики исследуемых распределителей дисперсной фазы

Характеристика	Число отверстий в боковой трубке N				
	2	3	4	5	6
Диаметр отверстий в трубке d_o , мм	4				
Шаг между отверстиями X_0 , мм	40				
Диаметр боковых трубок d_T , мм	8, 10, 12	10, 12, 14	12, 14, 16	14, 16, 18	16, 18, 20

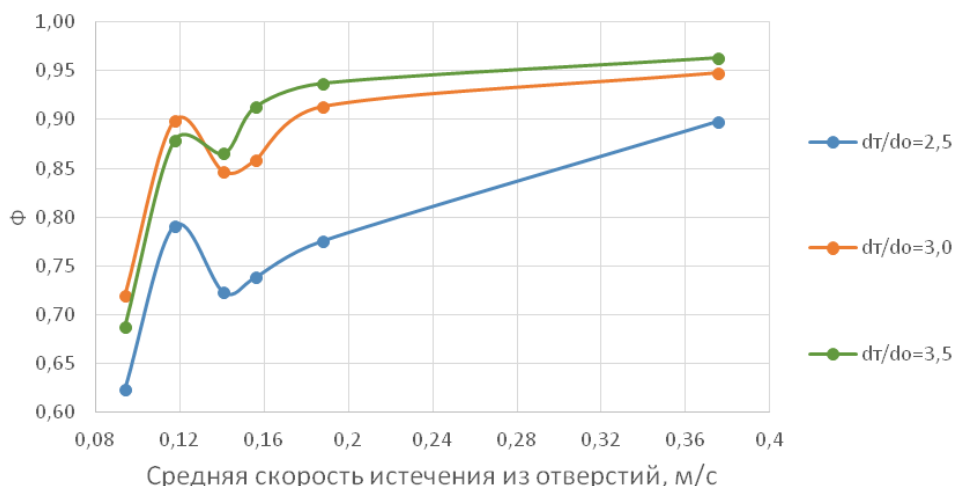


Рис. 3. Зависимость показателя Φ от скорости дисперсной фазы в отверстиях при различном соотношении диаметров трубок и отверстий d_T/d_o для трубок с 3 отверстиями

распределения Φ составляет не ниже 0.90. В табл. 2 приведены результаты расчета требуемого соотношения d_T/d_o при различном числе отверстий для струйного режима истечения, соответствующего оптимальной скорости истечения из отверстий 0.156 м/с.

Таблица 2
Зависимость требуемого соотношения d_T/d_o от числа отверстий в трубках, $\Phi = 0.90$

Число отверстий в боковой трубке N	Требуемое соотношение d_T/d_o при средней скорости истечения из отверстий 0.156 м/с
2	2.55
3	3.35
4	3.70
5	4.40

Данная зависимость может быть представлена в виде:

$$\frac{d_T}{d_o} = a_1 \sqrt{N} + a_0.$$

Для струйного режима истечения определены коэффициенты линейной регрессии: $a_1 = 2.16$, $a_0 = -0.48$. Коэффициент детерминации R^2 , рассчитанный в MS Excel, составил 0.98, что говорит о высоком качестве полученной зависимости.

Можно видеть, что при росте количества отверстий наблюдается стабильный рост требуемого диаметра трубок. Ввиду этого была рассмотрена зависимость требуемого соотношения сечений боковой трубки и сечения всех отверстий в ней $S_T/\Sigma S_o$, которое необходимо соблюдать для обеспечения показателя эффективности распределения $\Phi = 0.90$:

$$\frac{S_T}{\Sigma S_o} = \frac{S_T}{N S_o} = \frac{(d_T/d_o)^2}{N} = K.$$

С учетом полученной ранее зависимости $d_T/d_o = f(N)$ требуемое соотношение сечения боковой трубки и сечения всех отверстий будет определено следующим образом:

$$\frac{S_T}{\Sigma S_o} = K = \frac{(a_0 + a_1 \sqrt{N})^2}{N}.$$

Зачастую количество отверстий в боковых трубках распределителей промышленных экстракторов не превышает 10, в данном случае требуемое соотношение $S_T/\Sigma S_o$ равно:

$$\frac{S_T}{\Sigma S_o} = \frac{(-0.48 + 2.16 \cdot \sqrt{10})^2}{10} = 4.0.$$

При наличии бесконечно большого числа отверстий в трубке соотношение $S_T/\Sigma S_o$ асимптотически стремится к предельному значению:

$$\begin{aligned} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_T}{\Sigma S_o} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{(a_0 + a_1 \sqrt{N})^2}{N} = \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{a_0^2 + 2a_0 a_1 \sqrt{N} + a_1^2 N}{N} = a_1^2 = 4.7. \end{aligned}$$

Таким образом, при распределении потока жидкой дисперсной фазы в другую жидкую фазу площадь сечения боковых трубок распределителя должна быть в 4 раза выше суммарной площади поперечного сечения всех отверстий в ней (при наличии в трубках не более 10 отверстий). Полученные данные хорошо соотносятся с данными⁶, где для трубчатых распределителей пара, находящихся в жидкости, рекомендуют принимать площадь всех отверстий, равную 25% от площади поперечного сечения трубы.

На третьем этапе были определены пределы изменения подач дисперсной фазы, при которых

достигается эффективное распределение потока. Максимальная нагрузка соответствовала максимальной рекомендуемой скорости дисперсной фазы в отверстиях $U_{o,max} = 0.38$ м/с^{7, 8}, минимальная нагрузка $U_{o,min}$ – достигаемому показателю распределения $\Phi = 0.90$. Величина диапазона изменения нагрузок (*turndown ratio*) вычислялась по формуле:

$$TR = \frac{U_{o, max}}{U_{o, min}} = \frac{0.38}{U_{o, min}}.$$

Для возможности обобщения полученных результатов при различном числе отверстий уместно рассматривать зависимость диапазона изменения нагрузок от соотношения $S_T/\Sigma S_o$, данная зависимость приведена на рис. 4.

Можно сделать вывод, что при соотношении $S_T/\Sigma S_o < 2.5$ распределитель не обеспечивает приемлемого диапазона эффективной работы (значение TR менее 1.5). Расчетный анализ показывает, для большинства трубчатых распределителей с числом отверстий в трубках до 10 и требуемым соотношением $S_T/\Sigma S_o = 3.5\text{--}4.0$ диапазон эффективной работы TR составляет 2.2–2.6. Полученный результат хорошо согласуется с данными по распределителям жидкой фазы, представленными ведущими производителями внутренних устройств. В частности, согласно⁹, для трубчатых распределителей жидкости в насадочных ректификационных и абсорбционных колоннах диапазон изменения нагрузок составляет 2.5:1.

Литература

1. Structured Packings for Distillation, Absorption and Reactive Distillation. – Winterthur, Switzerland, Sulzer Chemtech Ltd. – 2003. – 28 p.
2. Lo T.C., Baird H.I., Hanson C. Handbook of Solvent Extraction. – New York: Wiley, 1983. – 980 p.
3. Nielsen R.B., Rogers J., Bullin J.A., Duewall K.J. Treat LPGs with Amines // *Hydrocarbon Processing*. – 1997. – Pp.49-59.
4. Sheilan M., Spooner B.H., Street D.E., Hoorn E. Amine Treating and Sour Water Stripping. – Amine Experts Inc. – 2005. – 520 p.
5. Mullabaev K.A., Churakova S.K. Development of a mathematical model of dispersed phase outflow using Volume of Fluid method // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2023. – V.59, №1-2. – Pp.95-104.
6. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. – М.: Химия, 1978. – 280 с.
7. Perry C.R. Several treating options open for ethane recovery Plants // *Oil & Gas Journal*. – 1977. – №5. – Pp.76-80.
8. Russell, R.M. Liquid-liquid Contactors Need Careful Attention // *Oil & Gas Journal*. – 1980. – №12. – P.135.
9. Intalox Packed Tower Systems. Packed Tower Internals: руководство по проектированию внутренних устройств насадочных колонн. – USA, Wichita, Koch-Glitsch LP, 2010. – 35 p.

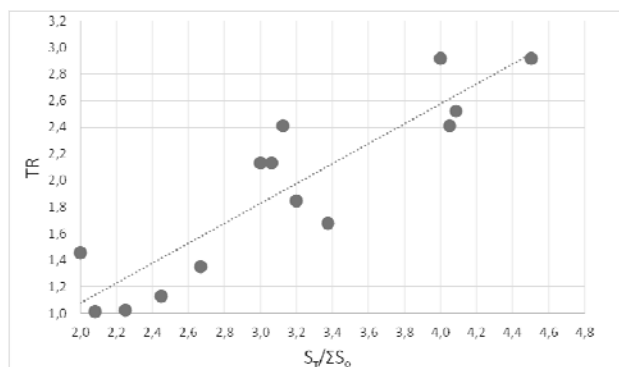


Рис. 4. Зависимость диапазона эффективной работы распределителя от соотношения $S_T/\Sigma S_o$

Таким образом, при струйном режиме истечения увеличение подачи дисперсной фазы и соотношения диаметра трубки и отверстий приводит к увеличению эффективности распределения; равномерность распределения дисперсной фазы может снижаться при переходе из капельного режима истечения в струйный; для обеспечения эффективного распределения потока соотношение площади сечения боковых трубок и суммарной площади сечения всех отверстий в ней должно составлять около 4.0; диапазон эффективной работы распределителей при рекомендованных параметрах конструкции составляет 2.2–2.6.

References

1. [Structured Packings for Distillation, Absorption and Reactive Distillation]. Winterthur, Switzerland, Sulzer Chemtech Ltd., 2003, 28 p.
2. Lo T.C., Baird H.I., Hanson C. [Handbook of Solvent Extraction]. New York, Wiley Publ., 1983, 980 p.
3. Nielsen R.B., Rogers J., Bullin J.A., Duewall K.J. [Treat LPGs with Amines]. *Hydrocarbon Processing*, 1997, pp.49-59.
4. Sheilan M., Spooner B.H., Street D.E., Hoorn E. [Amine Treating and Sour Water Stripping]. Amine Experts Inc., 2005, 520 p.
5. Mullabaev K.A., Churakova S.K. [Development of a mathematical model of dispersed phase outflow using Volume of Fluid method]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2023, vol.59, no.1-2, pp.95-104.
6. Александров И.А. *Rektifikatsionnye i absorbtionnye apparaty. Metody rascheta i osnovy konstruirovaniya* [Distillation and absorption apparatus. Calculation methods and design principles]. Moscow, Khimiya Publ., 1978, 280 p.
7. Perry C.R. [Several treating options open for ethane recovery plants]. *Oil & Gas Journal*, 1977, no.5, pp.76-80.
8. Russell, R.M. [Liquid-liquid Contactors Need Careful Attention]. *Oil & Gas Journal*, 1980, no.12, p.135.
9. [Intalox Packed Tower Systems. Packed Tower Internals: Packed Column Internals Design Guide]. USA, Wichita, Koch-Glitsch LP, 2010, 35 p.