



УДК 66.011

## ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ В КОЛОННЫХ АППАРАТАХ

### REVIEW OF METHODS FOR EVALUATION THE FLOW DISTRIBUTION UNIFORMITY IN THE COLUMN DEVICES

**Муллабаев Камиль Азаматович**

аспирант кафедры нефтехимии и химической технологии,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
kamil200995@gmail.com

**Чуракова Светлана Константиновна**

доктор технических наук, профессор,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
chskugntu@rambler.ru

**Валеев Анвар Ринатович**

аспирант кафедры нефтехимии и химической технологии,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
spestersnape@gmail.com

**Аннотация.** В статье обобщены основные экспериментальные и расчетные методы оценки равномерности распределения потоков в аппаратах колонного типа; отражены достоинства и недостатки каждого из методов.

**Ключевые слова:** CFD-анализ, обзор, равномерность распределения.

**Mullabaev Kamil Azamatovich**

Post-graduate of Department  
of Petrochemistry and Chemical Technology,  
Ufa State Petroleum Technological University  
kamil200995@gmail.com

**Churakova Svetlana Konstantinovna**

Doctor of technical Sciences, Professor,  
Ufa State Petroleum Technological University  
chskugntu@rambler.ru

**Valeev Anvar Rinatovich**

Post-graduate of Department  
of Petrochemistry and Chemical Technology,  
Ufa State Petroleum Technological University  
spestersnape@gmail.com

**Annotation.** The main experimental and computational methods for assessing the flow distribution uniformity in columns are summarized; the advantages and disadvantages of each of the methods are reflect.

**Keywords:** CFD-analysis, distribution uniformity, review.

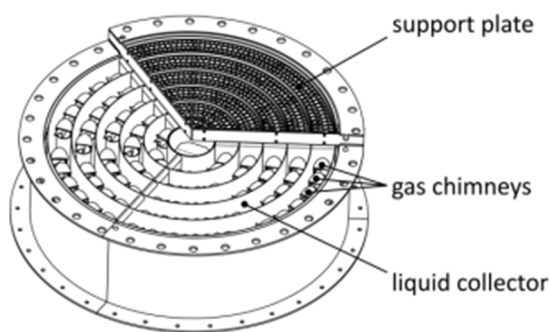
Обеспечение равномерности распределения потоков в экстракторах колонного типа является одним из основных факторов, предопределяющих эффективность дальнейшего контакта фаз друг с другом. Равномерное распределение потоков по всему сечению аппарата способствует увеличению эффективной площади контакта взаимодействующих фаз, а также выравниванию среднего времени пребывания локальных струй. Особенно сильное влияние эффективности изначального распределения наблюдается в противоточных насадочных экстракторах с достаточно большой высотой насадочных слоев, где зачастую могут возникать пристеночные эффекты. Ниже приводятся основные экспериментальные и расчетные методы оценки равномерности распределения потоков.

1. Метод, основанный на получении функции отклика. До недавнего времени основным методом анализа эффективности распределения потоков в аппаратах колонного типа являлся метод, основанный на построении так называемой функции отклика, который позволял рассчитать функцию распределения времени пребывания отдельных струй в аппарате. Суть данных методов заключается в том, что в ядро потока вводят специальное вещество (трассер), содержание которого фиксируют на выходе из аппарата различными методами [1, 2].

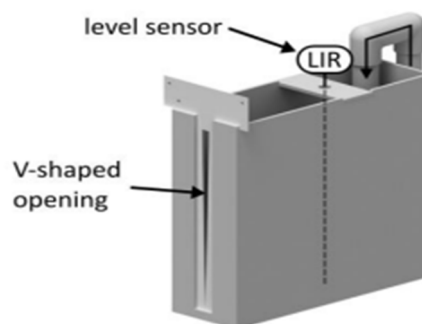
Достоинство таких методов состоит в том, что вводимый трассер почти не оказывает влияния на гидродинамическую обстановку в аппарате. Главным недостатком данных методов является необходимость проведения серий опытов с компонентами модельной системы. Кроме того, поскольку такой подход предполагает ввод трассера, то возникает потребность в его своевременном удалении из модельных компонентов.

2. Методы, основанные на непосредственном измерении расхода жидкости в различных областях сечения аппарата. Существуют экспериментальные методы оценки неравномерности распределения жидкой фазы, основанные на измерении расходов жидкости при помощи жидкостного коллектора, состоящего из множества отсеков [3]. На рисунке 1 представлен сборник, снабженный измерительными ячейками.

Измерительная ячейка представляет собой емкость малого объема, в которой имеется V-образная щель и датчик для измерения уровня жидкости. Определенному уровню жидкости соответствует определенный расход жидкости. Расход истекаемой из измерительной емкости жидкости при установившемся



**Рисунок 1** – Сборник, снабженный измерительными ячейками



**Рисунок 2** – Схема измерительной ячейки

режиме равен расход жидкости, поступающей в ячейку. На рисунке 2 представлена схема измерительной ячейки. Измеряя объемный расход жидкости через отдельную ячейку, находится так называемый фактор неравномерности распределения (maldistribution factor), который различными исследователями определялся различными способами [4, 5]:

$$M_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i - Q_0}{Q_0} \right)^2, \tag{1}$$

$$M_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_i - Q_0}{Q_0} \right| \cdot \frac{A_i}{A_N}, \tag{2}$$

где  $Q_i$  – объемный расход жидкости через  $i$ -ю ячейку сборника;  $Q_0$  – средний объемный расход жидкости;  $n$  – общее число ячеек;  $A_i$  – поперечное сечение  $i$ -ой ячейки;  $A_N$  – поперечное сечение аппарата.

Также в работе [6] описан метод экспериментального измерения содержания жидкости, основанный на электропроводимости среды, находящейся в ячейке, образованной проволоочной сеткой, на которую подается напряжение. На текущий момент данный метод оценки эффективности распределения не нашел широкого распространения.

Достоинства методов – возможность непосредственного измерения расхода жидкости в различных точках аппарата. Недостаток данных методов связан с необходимостью установки жидкостного коллектора, который может оказывать влияние на распределение потоков.

3. Расчетные методы оценки. С развитием технологий компьютерного моделирования, нарастанием вычислительных мощностей и развитием вычислительной гидродинамики все большее значение приобретают методы CFD-анализа, которые применяются при изучении движения жидкостей и газов в колоннах аппаратах, дополняя существовавшие ранее эмпирические методы. Несмотря на это, на текущий момент данные по расчетным методам оценки распределения потоков практически отсутствуют. В практических задачах при анализе эффективности распределения фаз в аппарате нередко обходятся лишь иллюстрациями с полями распределения скоростей, получаемыми по окончанию CFD-расчета. Среди способов численной оценки неравномерности распределения можно выделить метод, основанный на расчете коэффициента неравномерности распределения  $M_f$  [7, 8]:

$$M_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{U_i - U_0}{U_0} \right)^2}, \tag{3}$$

$$M_f = \sqrt{\frac{1}{S} \int_S \left( \frac{U - U_0}{U_0} \right)^2 dS}, \tag{4}$$

где  $U_i$  или  $U$  – скорость потока в  $i$ -ой ячейке расчетной области в рассматриваемом сечении  $S$ , м/с;  $U_0$  – фиктивная скорость потока в расчете на сечение аппарата, м/с;  $n$  – общее число ячеек.

Идеальному распределению соответствует значение  $M_f = 0$ , а хаотичному  $M_f = +\infty$ . Столь широкий диапазон значений функции  $M_f$  можно отнести к недостаткам, поскольку это не очень удобно в плане описания результатов. Кроме того, величина  $M_f$  не имеет физического смысла, а является лишь статистической функцией. Тем не менее, расчетные методы оценки не требуют проведения эксперимента, что является важным достоинством данных методов.

Таким образом, в настоящее время перспективными становятся исследования, связанные с созданием методик оценки эффективности распределения фаз в колонных аппаратах средствами CFD-анализа, позволяющих рационально оценить эффективность работы распределительных устройств.

**Список литературы:**

1. Некоторые аспекты исследования насадочных экстракционных колонн с целью изучения их гидродинамических и массообменных характеристик / К.А. Муллабаев [и др.] // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 5. – С. 180–182.
2. Самойлов Н.А. Моделирование в химической технологии и расчет реакторов. – Уфа : изд-во УГНТУ, 2005. – 224 с.
3. Hanusch F., Rehfeldt S., Klein H. Liquid Maldistribution in Random Packed Columns: Experimental Investigation of Influencing Factors // *Chemical Engineering & Technology*. – 2018. – V. 41. – № 11. – 18 p.
4. Schultes M. Influence of Liquid Redistributors on the Mass-Transfer Efficiency of Packed Columns // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2000. – V. 39. – № 5. – P. 1381–1389.
5. Performance comparison of a structured bed reactor with and without a chimney tray on the gas-flow maldistribution: A computational fluid dynamics study / H. Troudi [et al.] // *Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2020. – 15 p.
6. Llamas J.-D., Lesage F., Wild G. Influence of gas flow rate on liquid distribution in trickle-beds using perforated plates as liquid distributors // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2008. – V. 48. – № 1. – P. 7–11.
7. CFD-анализ – современный подход к исследованию процесса разделения и распределения потоков в устройствах ввода сырья массообменных аппаратов / Т.И. Маннанов [и др.] // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 5. – С. 159–165.
8. Higler A., Krishna R., Taylor R. Nonequilibrium Cell Model for Packed Distillation Columns – The Influence of Maldistribution // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1999. – V. 38. – № 10. – P. 3988–3999.

**List of references:**

1. Some aspects of the study of packed extraction columns in order to study their hydrodynamic and mass transfer characteristics / K.A. Mullabaev [et al.] // *Bulatov readings*. – 2020. – V. 5. – P. 180–182.
2. Samoilov N.A. Modeling in Chemical Technology and Calculation of Reactors. – Ufa : publishing house of UGNTU, 2005. – 224 p.
3. Hanusch F., Rehfeldt S., Klein H. Liquid Maldistribution in Random Packed Columns: Experimental Investigation of Influencing Factors // *Chemical Engineering & Technology*. – 2018. – V. 41. – № 11. – 18 p.
4. Schultes M. Influence of Liquid Redistributors on the Mass-Transfer Efficiency of Packed Columns // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2000. – V. 39. – № 5. – P. 1381–1389.
5. Performance comparison of a structured bed reactor with and without a chimney tray on the gas-flow maldistribution: A computational fluid dynamics study / H. Troudi [et al.] // *Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2020. – 15 p.
6. Llamas J.-D., Lesage F., Wild G. Influence of gas flow rate on liquid distribution in trickle-beds using perforated plates as liquid distributors // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2008. – V. 48. – № 1. – P. 7–11.
7. CFD-analysis – a modern approach to the study of separation and distribution of flows in the input devices of raw materials of mass exchange apparatuses / T.I. Mannanov [et al.]. – 2020. – V. 5. – P. 159–165.
8. Higler A., Krishna R., Taylor R. Nonequilibrium Cell Model for Packed Distillation Columns – The Influence of Maldistribution // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1999. – V. 38. – № 10. – P. 3988–3999.