ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛОТНОЙ УКЛАДКИ АДСОРБЕНТА В КОЛОННУ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

THE USE OF TECHNOLOGY FOR ADSORBENT STACKING INTO THE COLUMN FOR INCREASING ITS USE EFFICIENCY

Л. Т. Файзуллина
L. T. Faizullina

Е. Ю. Туманова
E. Yu. Tumanova

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Статья посвящена исследованию процесса адсорбции в колонном аппарате.

Эффективность процесса адсорбции зависит от многих факторов: отсутствие проскоков извлекаемого компонента, равномерное продвижение фронта адсорбции.

Выбор технологии укладки адсорбента в колонну для наиболее эффективного использования адсорбента должен быть произведен по результатам исследования гидродинамики потока, а также исследования процесса поглощения адсорбентами извлекаемого компонента.

В настоящее время одним из эффективных методов исследования гидродинамики процесса поглощения является метод вычислительной гидродинамики, выполняемый в программных комплексах с конечно-элементным анализом. Данный метод позволяет с высокой скоростью расчета и задаваемой точностью получить полное представление о распределении скорости потоков, концентрации веществ, изменении перепада давления при различных технологиях загрузки адсорбента в колонне.

В статье исследована конечно-элементная модель при различных способах укладки адсорбента в колонный аппарат. По результатам численного моделирования определены распределение скоростей, давления и концентрации потока в модели. Наиболее важным параметром для количественной и качественной оценки результатов исследования является продвижение фронта адсорбции.

Для повышения эффективности адсорбции в колонном аппарате необходимо применение технологии плотной укладки адсорбента в колонну, способствующее более равномерному продвижению фронта адсорбции, и результатов исследования влияния применения плотной загрузки на эффективность процесса адсорбции.

Ключевые слова

адсорбционная колонна,
адсорбция, CFD,
плотная загрузка,
неплотная загрузка,
гидравлическое
сопротивление,
фронт адсорбции

This article is devoted to the investigation of the adsorption process in a column apparatus. The efficiency of the adsorption process depends on many factors: the absence of breakthroughs in the extracted component, the steady advance of the adsorption front.

The choice of the technology for adsorbent stacking into the column should be made based on the results of hydrodynamics study of the flow, as well as studies of the adsorbent absorption process of the extracted component for the most effective use of the adsorbent. At present, one of the most effective methods for studying the hydrodynamics of the adsorption process is the method of computational hydrodynamics performed in software complexes with finite element analysis. This method allows to obtain a complete idea of the distribution of the flow velocity, the concentration of substances, the change in the pressure drop using different technologies of adsorbent loading into a column with a high calculation speed and a given accuracy.

In the article, a finite-element model for various ways of adsorbent stacking into a column apparatus is investigated. Based on the results of numerical simulation, the distribution of velocities, pressure, and flow concentrations in the model is determined.

Key words

adsorption column,
adsorption, CFD,
dense loading,
loose loading,
hydraulic resistance,
adsorption front

The most important parameter for quantitative and qualitative evaluation of the research results is the promotion of the adsorption front.

To increase the efficiency of adsorption in the column apparatus, it is necessary to use the technology of dense packing of the adsorbent into the column, which promotes more steady advance of the adsorption front, and the results of the investigation of the effect of the dense loading use on the adsorption process efficiency.

Актуальной проблемой является рациональное использование энергетических и материальных ресурсов. Одним из пунктов экономии является обеспечение эффективного использования адсорбентов в процессе адсорбции. В колонном аппарате применяется адсорбент, который загружается навалом через рукав, либо при помощи специальных устройств для обеспечения плотной укладки [1]. Плотная укладка адсорбента позволяет увеличить эффективность использования.

Одной из главных причин снижения эффективности адсорбционной колонны связано с каналобразованием при движении потока через неплотный слой адсорбента. Данную проблему можно исключить применением технологии плотной укладки адсорбента в колонну [2].

При плотной укладке минимизируется воздушная прослойка между элементами-адсорбентами. Соответственно увеличивается объем загружаемого материала и активная адсорбционная поверхность. Снижается вероятность возникновения каналобразного течения потока сырья. Для адсорбентов цилиндрической формы максимально плотная укладка достигается при параллельном расположении элементов с касанием друг друга по образующей.

Численное моделирование гидродинамики потока газа предполагает создание 3D модели насыпного слоя адсорбента. Разработанная методика построения 3D модели основывается на теоретически обоснованном критерии подобия — порозности насыпного слоя адсорбента.

Порозность — это доля свободного от насыпного материала объема или отношение свободного объема между адсорбентами к полному объему насыпного слоя. Создадим элементарный объем свободного пространства, параллелепипед с размерами a и L , вокруг цилиндра с диаметром d , имитирующего адсорбент. Элементарный объем показан на рисунке 1.

Размеры a , L и d определяются из известной формулы порозности насыпного слоя, разработанной авторами:

Рисунок 1. Элементарный объем

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{св.прос.}}}{V_{\text{общ.}}} = \frac{V_{\text{пар}} - V_{\text{цил}}}{V_{\text{пар}}} = \frac{a \cdot a \cdot L - 0,785 \cdot d^2 \cdot L}{a \cdot a \cdot L} = 1 - 0,785 \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^2. \quad (1)$$

Из практических данных [3] известны значения порозности при плотной и неплотной загрузке соответственно 0,54 и 0,61. Задан размер диаметра адсорбента 5 мм, как для цеолита, широко используемого для осушки газа [4]. По формуле 1 определим размер стороны a . При плотной укладке он составит 6,5 мм, а при неплотной загрузке 7 мм. 3D модель состоит из целого числа элементарных объемов, для численного расчета гидродинамики процесса примем по ширине 10 элементарных объемов, по высоте 20 элементарных объемов. Общие размеры модели для плотной загрузки 65×65×130 мм, при неплотной загрузке 70×70×140 мм [5].

Модель для CFD моделирования состоит из элементарных объемов, ориентированных различным образом для плотной и неплотной загрузки. На основании экспериментального исследования способов загрузки адсорбента в колонну было определено расположение элементарных объемов [3]. Разработанные 3D модели приведены на рисунке 2 а, б.

При плотной укладке адсорбенты в элементарном объеме располагаются соосно, а в общем объеме модели параллельно и в шахматном порядке. При неплотной загрузке адсорбенты в элементарном объеме смещены относительно центральной оси и в общем объеме располагаются компланарно.

Рисунок 2. 3D модели для CFD моделирования: 3D модель плотной загрузки (а), 3D модель неплотной загрузки (б)

Моделирование гидродинамики процесса проводилось в различных программных комплексах FlowVision [6] и ANSYS CFX [7]. Гидродинамика моделировалась в среде воздуха при 25 °С и газа с плотностью 3,51 кг/м³ и вязкостью 1,75·10⁻⁵ Па·с, при аналогичных граничных условиях. Оценивалось распределение скорости на горизонтальной секущей плоскости (рисунок 3) и перепад давления на

вертикальной секущей плоскости (рисунок 4). Численные расчеты показали хорошую сходимость результатов [8].

На рисунке 3 показаны средние значения скорости по горизонтальной секущей плоскости. Значения средней скорости для плотной и неплотной загрузки для обеих сред имеют очень близкие значения, при этом разница между наибольшим и наименьшим значением скорости значительно больше для неплотной загрузки адсорбента.

На горизонтальной секущей для неплотной загрузки насыпного материала выявлены зоны темного цвета, где скорость потока достигает максимального значения и, соответственно, является причиной возникновения канального проскока сырья.

Оценка значения гидравлического сопротивления насыпного слоя адсорбента при численном расчете определяется по рисунку 4 как разница между давлением на входе в модель и на выходе из модели. При аналитическом расчете значение гидравлического сопротивления определяется по формуле

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{H}{d_p} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}. \quad (2)$$

Рисунок 3. Распределение скорости на горизонтальной секущей плоскости

Рисунок 4. Распределение давления на вертикальной секущей плоскости

Результаты CFD моделирования и аналитического расчета сведены в таблицу 1. Критерием сходимости результатов выбран коэффициент сопротивления (ξ).

Результаты расчета подтверждают правильность построения 3D модели и возможность дальнейшего исследования процесса поглощения.

CFD моделированием установлено, что значение коэффициента сопротивления определяется способом укладки адсорбента в колонне и при плотной загрузке это значение больше, чем при неплотной. При аналитическом расчете не учитывается влияние способа укладки, чем и вызвана разница между аналитическим и численным расчетом.

Таблица 1. Сопоставление численного и аналитического расчета

Параметр		Плотная загрузка		Неплотная загрузка	
		CFD	Аналит.	CFD	Аналит.
Порозность, ε		0,56	0,54	0,62	0,61
Скорость средняя по объему, м/с		1,7	1,5	1,5	1,3
Перепад давления ΔP , Па	Воздух	96,1	84,0	45,9	46,1
	Газ	250,2	237,1	120,3	134,4
Коэффициент сопротивления λ	Воздух	2,50	2,42	2,18	2,41
	Газ	2,80	2,42	2,39	2,41

Для решения задачи с учетом поглощения адсорбентом одного компонента смеси газа в ПК ANSYS CFX строится объемная сетка конечных элементов с локальной адаптацией сетки вокруг адсорбента цилиндрической формы. Автоматическая сетка грубая, с большими размерами конечных элементов по сравнению с расстоянием между цилиндрами (адсорбентами), и это не дает возможности рассмотреть продвижение фронта адсорбции более детально. При создании сетки для модели плотной загрузки использовались следующие размеры: диаметр адсорбента 5 мм, шаг одного элемента сетки 0,7 мм. Адаптация сетки рядом с цилиндрами проводится посредством построения дополнительных слоев. Для этого при неплотной загрузке вокруг окружности цилиндра строится квадрат со стороной 5,6 мм. Сторона квадрата и половина окружности делятся на 8 равных частей и соединяются лучами. Получившиеся лучи разбиваем на четыре отрезка с возрастающими размерами в соотношении 0,1:0,2:0,3:0,4 от центра к периферии. Получившиеся отрезки на лучах соединяем и получаем 4 слоя

элементов увеличивающейся толщины. Сетка для неплотной модели представлена на рисунке 5, а. Для плотной укладки адсорбента предложен несколько иной способ построения. Элемент адсорбента вписан в шестигранное пространство вокруг него. И для постепенного уменьшения толщины элементов при приближении к поверхности адсорбента опять строятся лучи через равные расстояния и дробятся на четыре неравных по длине отрезка. Концы отрезков соединяем в ломаную окружность. Готовый вариант сетки приведен на рисунке 5, б.

Для неплотной модели необходимо задать эксцентриситет расположению цилиндра в описывающем его квадрате. Причем этот эксцентриситет может быть различным по значению и направлению. Из подготовленных плоских сеток вокруг одного адсорбента путем многократного копирования создаем 6 элементов в 8 слоев. При плотной загрузке сетку увеличиваем в объеме до 7 элементов и 12 слоев. Полученные объемные сетки показаны на рисунке 6. Задаем различные части (Part): INLET, OUTLET, SYM1,2,3,4, INTUBE, для

а) неплотная; б) плотная

Рисунок 5. Размеры элементарной сетки

а)

а) неплотная; б) плотная

Рисунок 6. Модели объемной сетки

упрощения работы при задании граничных условий в Setup.

Задаем следующие граничные условия:

- вход (Inlet) со скоростью потока 0,8 м/с, компоненты CH_4 и Watervapour, соответственно в соотношении концентраций 0,2 и 0,8;

- выход (Outlet) задаем свободным с давлением 1 МПа;

- симметрия (Symmetry) для боковых стенок моделей;

- трубки (INTUBE) задаем с условием Wall и задаем отрицательные источники для моделирования поглощения вещества на поверхности стенки. Адсорбентами будет поглощаться водяной пар (Watervapour) с массовой скоростью поглощения $1,352 \cdot 10^{-5}$ кг/с, значение аналогично для цеолитной очистки природного газа [4].

Постановка задачи поглощения строится на задании источников одного из компонентов газовой смеси, только источник выбирается «отрицательный», т. е. компоненту присваивается отрицательное значение скорости, что показывает направление данного компонента не внутрь расчетной области, а из нее. В данной задаче извлекаемый компонент избирательно выходит из расчетной области внутрь цилиндров, имитирующих адсорбенты. Метод постановки задачи поглощения предполагает задание для всех адсорбентов равную массовую

скорость поглощения компонента из потока. Моделирование проводится в нестационарном режиме, поэтому позволяет наблюдать за протеканием процесса с течением времени и распространение фронта адсорбции.

Проводим расчет в стационарном режиме и получаем следующее распределение концентраций водяного пара при плотной и неплотной модели, показанное на рисунке 7.

Расчет проводился при аналогичных временных условиях. Однако при этом при неплотной загрузке наглядно видны проскоки извлекаемого компонента и неравномерность фронта адсорбции, тогда как при плотной наблюдается равномерное продвижение фронта адсорбции.

Для визуализации процесса адсорбции и наглядной демонстрации ее течения с ходом времени проводим расчет в нестационарном режиме, для этого задаем аналогичные условия, как и для стационарного режима, однако начальные значения параметров загружаем из результатов стационарного расчета. Нестационарный расчет позволяет рассмотреть продвижение фронта адсорбции с течением времени. Проводим расчет и получаем следующее распределение концентраций на рисунке 8.

Как видно на рисунке 8, при равных временных условиях и условиях поглощения извлекаемого компонента — водяного пара, фронт адсорбции для неплотной загрузки с

Рисунок 7. Распределение концентраций водяного пара

Рисунок 8. Распределение концентраций водяного пара

неровными граничными контурами, что связано с проскоками компонента из-за неравномерной укладки адсорбента. При плотной загрузке фронт адсорбции продвигается равномерно и дальше вследствие большего гидравлического сопротивления, обусловленного расположением частиц.

Ни один слой визуализации не дает более полного представления о фронте адсорбции, как изоповерхность. Данный слой визуализации позволяет рассмотреть криволинейную

поверхность в 3D формате и детально оценить распределение вещества и количество канальных проскоков сырья [9]. На рисунке 9 рассмотрена визуализация изоповерхности построенной по концентрации извлекаемого вещества со значением 0,1.

Объемное представление фронта адсорбции также демонстрирует равномерное продвижение его при плотной загрузке, а при неплотной с проскоками извлекаемого компонента.

Рисунок 9. Продвижение фронта адсорбции с концентрацией 0,1

Выводы

Моделирование процесса адсорбции позволило доказать, что применение технологии плотной укладки адсорбента в колонну повышает эффективность использования адсорбента за счет того, что однородный слой позволяет избежать возникновения канальных проскоков сырья, уменьшить высоту фронта адсорбции и объема неиспользуемого адсорбента, добиться равномерного продвижения

фронта адсорбции и увеличить цикл адсорбция – десорбция, поскольку при появлении проскоков извлекаемого компонента предельно допустимой концентрации адсорбер переключают на десорбцию. Применение технологии плотной загрузки адсорбента повышает эффективность его использования, а следовательно, положительно влияет на вопросы ресурсо- и энергосбережения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хафизов И.М., Гафаров Р.З., Жирнов Б.С., Степанов Д.А., Хафизов А.М. Оптимизация процесса загрузки и регенерации адсорбента // Фундаментальные исследования. 2017. № 10–1. С. 56–61.
2. Паранук А.А., Хрисониди В.А., Анализ современных адсорберов // Евразийский союз ученых. 2016. № 7(28). С. 36–39.
3. Искалиева С.К., Пивоварова Н.А., Литвинова Г.И. Экспериментальная установка для изучения эффективности адсорбционного процесса // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2008. № 6. С. 164–166.
4. Жамилова Н.К.К., Зарипов М.Х.У., Мирзаев С.С. Изучение процесса регенерации цеолитовой очистки природного газа на УДП «Шуртаннефгаз» // Вопросы науки и образования. 2017. № 2. С. 45–47.
5. Файзуллина Л.Т., Туманова Е.Ю. Численное моделирование гидродинамики потока в слое адсорбента // БАШНЕФТЬ-2016: сборник тезисов науч.-техн. конф. 2016. С. 76–79.
6. Туманова Е.Ю. Использование CAE-системы FlowVision для исследования взаимодействия потоков жидкости в центробежно-струйной форсунке // САПР и графика. 2005. № 9. С. 24–28.
7. Файзуллина Л.Т., Туманова Е.Ю. Численное моделирование гидродинамики потока в слое адсорбента // Актуальные проблемы науки и техники — 2017: сб. статей, докл. и выступл. IX Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. 2017. С. 33–35.
8. Nouh S.A., Lau K.K., Shariff A.M. Modeling and Simulation of Fixed Bed Adsorption Column using Integrated CFD Approach // Journal of Applied Sciences. 2010. No. 10. P. 3229–3235.
9. Асылкаев Р.Д., Туманова Е.Ю., Четверткова О.В. CFD-моделирование гидродинамики жидкости в улиточного типа устройстве ввода потока в колонну // Актуальные проблемы науки и техники — 2016: сб. ст., докл. и выступл. IX Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. 2016. С. 26–28.

REFERENCES

1. Hafizov I.M., Gafarov R.Z., Zhirnov B.S., Stepanov D.A., Hafizov A.M. Optimizatsiya protsessa zagruzki i regeneratsii adsorbenta [Optimization of the Process of Loading and Regeneration of the Adsorbent].

Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research, 2017, No. 10-1, pp. 56–61. [in Russian].

2. Paranuk A.A., Hrisonidi V.A. Analiz sovremennykh adsorberov [Analysis of Modern Adsorbers]. *Evrasiiskii soyuz uchenykh – Eurasian Union of Scientists*, 2016, No. 7 (28), pp. 36–39. [in Russian].

3. Iskalieva S.K., Pivovarova N.A., Litvinova G.I. Eksperimental'naya ustanovka dlya izucheniya effektivnosti adsorbtsionnogo protsessa [Experimental Setup for Studying the Efficiency of the Adsorption Process]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Astrakhan State Technical University*, 2008, No. 6, pp. 164–166. [in Russian].

4. Zhamilova N.K.K., Zaripov M.H.U., Mirzaev S.S. Izuchenie protsessa regeneratsii tseolitovoi ochistki prirodnogo gaza na UDP «Shurtannefgaz» [Study of the Process of Regeneration of Zeolite Purification of Natural Gas at the Shurtannefgaz US]. *Voprosy nauki i obrazovaniya – Issues of Science and Education*, 2017, No. 2, pp. 45–47. [in Russian].

5. Fajzullina L.T., Tumanova E.Ju. Chislennoe modelirovanie gidrodinamiki potoka v sloe adsorbenta [Numerical Simulation of Flow Hydrodynamics in the Adsorbent Layer]. *Materialy nauchno-tehnicheskoy konferencii «BASHNEFT-2016»*. [Materials of the Scientific and Technical Conference «BASHNEFT-2016»]. Ufa, 2016, pp. 76–79. [in Russian].

6. Tumanova E.Ju. Ispolzovanie CAE-sistemy FlowVision dlya issledovaniya vzaimodeystviya potokov zhidkosti v tsentrobezhno-struinoi forsунке [Using CAE-system FlowVision to Study the Interaction of Fluid Flows in a Centrifugal-jet Nozzle]. *SAPR i grafika — CAD and Graphics*, 2005, No. 9, pp. 24–28. [in Russian].

7. Fajzullina L.T., Tumanova E.Ju. Chislennoe modelirovanie gidrodinamiki potoka v sloe adsorbenta [Numerical Simulation of Flow Hydrodynamics in the Adsorbent Layer]. *Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy nauki i tekhniki — 2017»*. [Materials of the IX International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «Current Problems of Science and Technology — 2017»]. Ufa, 2017, pp. 33–35. [in Russian].

8. Nouh S.A., Lau K.K., Shariff A.M. Modeling and Simulation of Fixed Bed Adsorption Column using Integrated CFD Approach. *Journal of Applied Sciences*, 2010, No. 10, pp. 3229–3235.

9. Asylkaev R.D., Tumanova E.Ju., Chetvertkova O.V. CFD-modelirovanie gidrodinamiki zhidkosti v ulitchnogo

tipa ustrojstve vvoda potoka v kolonnu [CFD-simulation of Fluid Hydrodynamics in a Convict-Type Device for Introducing a Stream into a Column]. *Materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh*

uchenyh «Aktual'nye problemy nauki i tehniki — 2016» [Materials of the IX International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «Actual Problems of Science and Technology-2016»]. Ufa, 2016, pp. 26–28. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Файзуллина Л. Т., магистрант группы MMA0-16-01, ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация
L. T. Faizullina, Undergraduate Student of MMA0-16-01 Group, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation
e-mail: laysanfaizullina@mail.ru

Туманова Е. Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация
E. Yu. Tumanova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Technology of Petroleum Machinery Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation
e-mail: tumanova-elena@mail.ru