

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА МАССООБМЕННОЙ ТАРЕЛКЕ КОЛОННОГО АППАРАТА ОТ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЛОТНА ТАРЕЛКИ МЕТОДОМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

### DETERMINATION OF PRESSURE DROP DEPENDENCE OF MASS TRANSFER PLATE OF COLUMN APPARATUS ON PLATE BLADE CONTAMINATION DEGREE BY CFD-SIMULATION

**П. А. Галкин**  
**Pavel A. Galkin**

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

Ufa State Petroleum  
Technological University,  
Ufa, Russian Federation

**Е. Ю. Туманова**  
**Elena Yu. Tumanova**

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

Ufa State Petroleum  
Technological University,  
Ufa, Russian Federation

**О. Я. Галкина**  
**Oksana Ya. Galkina**

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

Ufa State Petroleum  
Technological University,  
Ufa, Russian Federation

Цель данной работы: моделирование движения потока паров через полотно массообменной тарелки и анализ зависимости перепада давления на тарелке от степени загрязнения ее отверстий.

Построение точной полноразмерной модели с детальной отрисовкой всех отверстий в перфорированной поверхности для конечно-элементного анализа не оправдано, поэтому в работе будут применены методы компьютерного прототипирования. Для обозначения в аппарате поверхности, которая соответствует перфорированной поверхности, будет использован модуль «пористый материал», позволяющий пропускать текучую среду, но оказывать ей сопротивление, аналогичное заменяемому материалу.

В статье представлена зависимость перепада давления на массообменной тарелке колонного аппарата от степени загрязнения полотна тарелки, которая необходима для совершенствования работы колонного аппарата и предотвращения потерь технологического режима. Для моделирования гидродинамики движение пара через полотно тарелки предложено прототипирование массообменной тарелки пористой средой, обладающей такими же пропускными свойствами. Для математического описания этого процесса были заданы свойства пористого слоя, такие как пористость и интенсивность сопротивления.

С помощью программного комплекса ANSYS CFX смоделирована гидродинамика движения потока пара через полотно массообменной тарелки и определена зависимость перепада давления на тарелке от степени загрязнения отверстий полотна. Представлена визуализация перепада давления на массообменной тарелке. Смоделирована гидродинамика движения пара через полотно массообменной тарелки и определена зависимость перепада давления на тарелке от степени загрязнения отверстий тарелки. Полученная зависимость представлена на графике. Данная методика может быть использована не только для моделирования движения пара через полотно массообменной тарелки, но и через любую перфорированную поверхность.

#### Ключевые слова

перепад давления;  
массообменная тарелка;  
степень загрязнения;  
пористый слой; гидродинамика;  
CFD-моделирование

The purpose of this work is to simulate the movement of vapor movement through the mass transfer plate blade and to analyze the dependence of the pressure drop on the plate on the degree of contamination of its holes.

The construction of an accurate full-size model with detailed drawing of all holes in the perforated surface for finite element analysis is not justified, so the methods of computer prototyping will be applied. To indicate the surface in the apparatus that corresponds to the perforated surface, the «porous material» module will be used, which allows to pass the fluid, but to resist it, similar to the replaced material.

The article presents the pressure drop dependence of mass transfer plate of column apparatus on plate blade contamination degree, which is necessary to improve the operation of the column apparatus and prevent the losses of technological regime.

To simulate the hydrodynamics of vapor movement through the plate, a prototyping of the mass transfer plate by a porous medium with the same movement properties is proposed.

The properties of the porous layer, such as porosity and resistance intensity, were set for the mathematical description of this process.

Using the ANSYS CFX software package, the hydrodynamics of the vapor movement through the mass transfer plate blade is simulated and the dependence of the pressure drop on the plate on the degree of contamination of the blade holes is determined. The visualization of the pressure drop on the mass transfer plate is presented. Simulated hydrodynamics of the vapor movement through the mass-exchange plate blade and the dependence of differential pressure on the plate to the contamination degree of the plate holes. The obtained dependence is shown on the graph. This technique can be used not only to simulate the vapor movement through a mass transfer plate, but also through any perforated surface.

В статье представлена зависимость перепада давления на массообменной тарелке колонного аппарата от степени загрязнения полотна тарелки, которая необходима для совершенствования работы колонного аппарата и предотвращения потери технологического режима [1, 2].

Для определения зависимости перепада давления на массообменной тарелке от степени загрязнения ее полотна была построена задача моделирования гидродинамики движения потока пара через ее полотно [3].

Данная задача была решена CFD-моделированием в ANSYS CFX.

Построение точной полноразмерной модели с детальной отрисовкой всех отверстий в перфорированной поверхности для конечно-элементного анализа не оправдано, поэтому в работе применены методы компьютерного прототипирования [4, 5]. Для обозначения в аппарате поверхности, которая соответствует перфорированной поверхности, будет использован модуль «пористый материал», позволяющий пропускать текучую среду, но оказывать ей сопротивление, аналогичное заменяемому материалу [6].

Для анализа и визуализации гидродинамики потока пара в аппарате построена пол-

### Key words

pressure drop; mass transfer plate; contamination degree; porous layer; hydrodynamics; CFD-simulation

номасштабная компьютерная модель одной массообменной тарелки аппарата. Загрязнения могут быть различного характера, но в любом случае загрязнения закрывают часть отверстий, перфорирующих полотно тарелки или отверстие целиком, уменьшая доступное для прохождения потока сечение [7, 8].

Моделирование течения жидкости/газа через малые отверстия, диаметр которых не превышает 20–30 мм, при диаметре аппарата 1000–3000 мм требует большого, более 107, количества элементов, т.е. значительных затрат вычислительных ресурсов, что практически невозможно с применением современных персональных компьютеров [9]. Поэтому для моделирования течения через пластины с отверстиями их можно заменить областями, обладающими аналогичным сопротивлением потоку. В ANSYS такие области могут быть смоделированы пористыми доменами (Porous domain).

Для того чтобы использовать в расчете пористые домены, необходимо задать их свойства: проницаемость и коэффициент сопротивления.

Проницаемость — способность материала фильтровать сквозь себя при наличии перепада давления. Определяется по известному уравнению Дарси,  $m^2$  [10]:

$$K_T = \frac{Q \cdot v \cdot \rho \cdot h_T}{\Delta P \cdot F_T},$$

где Q — производительность, м<sup>3</sup>/с; v — кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с; ρ — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>; h<sub>T</sub> — толщина полотна тарелки, м; ΔP — перепад давления на тарелке, Па; F<sub>T</sub> — площадь поверхности полотна тарелки, м<sup>2</sup>.

Альтернативно для определения параметров сопротивления пористой среды могут быть заданы коэффициенты сопротивления [10]:

$$C_R = \frac{v \cdot \rho}{K_T}.$$

Для моделирования загрязнения полотна тарелки необходимо ввести понятие «степень загрязнения». Степень загрязнения — это доля уменьшения площади проходного сечения отверстий, которая выражается формулой [10]:

$$\eta = 1 - \Delta d^2,$$

где Δd — доля диаметра отверстия, по мере загрязнения поверхности полотна:

$$\Delta d = \frac{d'_o}{d_o},$$

где d'<sub>o</sub> — диаметр отверстия с учетом загрязнения, м; d<sub>o</sub> — диаметр чистого отверстия, м.

Для чистой поверхности Δd=1, а для полностью загрязненной Δd=0. Таким образом, степень загрязнения чистой поверхности η=0, а для полностью загрязненной η=1.

При моделировании степень загрязнения будет изменяться от 0 % до 90 %, что соответствует уменьшению диаметра отверстия от 0 % до 70 %.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Основные параметры для задания пористого слоя

Параметр		Степень загрязнения поверхности массообменной тарелки					
		0 %	36 %	58 %	75 %	84 %	91 %
Диаметр отверстия	d <sub>o</sub> , м	0,01	0,008	0,007	0,005	0,004	0,003
Доля диаметра	Δd, %	100 %	80 %	75 %	50 %	40 %	30 %
Шаг расположения отверстий	b, м	0,0025					
Площадь одного отверстия в поверхности тарелки	f <sub>o</sub> , м <sup>2</sup>	0,00008	0,00005	0,00004	0,00002	0,00001	0,00001
Площадь поверхности тарелки, соответствующей одному отверстию	f <sub>1</sub> , м <sup>2</sup>	0,000541					
Пористость	ε	0,145	0,093	0,071	0,036	0,023	0,013
Коэффициент гидравлического сопротивления	ξ1 (1)	66	166	287	1118	2767	8947
Общая площадь поверхности тарелки	F <sub>φ</sub> , м <sup>2</sup>	0,497					
Скорость набегания потока	v <sub>φ</sub> , м/с	1,7304					
Расчетный перепад давления на тарелке	ΔP, Па	59	149	256	1000	2473	7996
Проницаемость тарелки	K <sub>T</sub> , м <sup>2</sup>	3,50E-9	1,39E-9	8,07E-10	2,07E-10	8,35E-11	2,58E-11
Коэффициент сопротивления пористого материала	CR	3,41E+3	8,59E+3	1,48E+4	5,78E+4	1,43E+5	4,62E+5

Программа ANSYS CFX позволяет смоделировать гидродинамику движения потока пара через полотно массообменной тарелки (с использованием пористого слоя) и визуализировать распределение перепада давления на цветовых полях (рисунок 1), а также определить значение перепада давления на массообменной тарелке.

На цветовом поле заметен перепад давления на массообменной тарелке, для определения значения перепада были определены средние значения на плоскостях до и после тарелки.

По полученным данным, моделированием в программе ANSYS определено значение перепада давления на массообменной тарелке. Аналогичные расчеты проведены для тарелки с различной степенью загрязнения отверстий. Полученные данные представлены в таблице 2.

По полученным данным построен график зависимости перепада давления от степени загрязнения. График приведен на рисунке 2.

По полученному графику была аппроксимирована функция, описывающая эту закономерность:

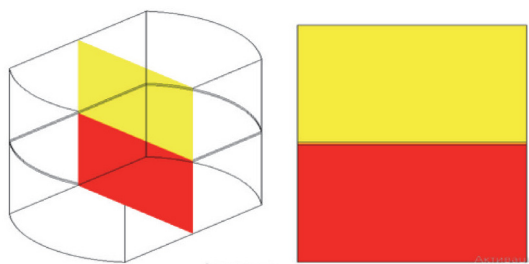


Рисунок 1. Распределение давления

Таблица 2. Результаты моделирования в ANSYS CFX

Параметр		Степень загрязнения					
		0 %	36 %	58 %	75 %	84 %	91 %
Перепад давления на аппарате	$\Delta P$ , Па	134	273	419	1461	3556	11455

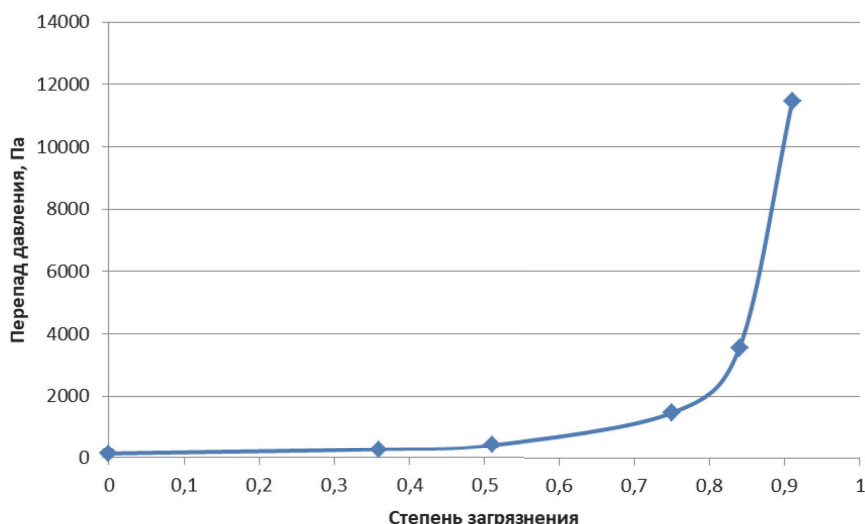


Рисунок 2. Зависимость перепада давления от степени загрязнения

$$\Delta P = 2,5 + \frac{1}{(1-\eta)^{2,5\eta}},$$

где  $\eta$  — степень загрязнения полотна тарелки, т.е. доля уменьшения площади проходных отверстий.

**Выводы**

Смоделирована гидродинамика потока пара, проходящего через полотно массообменной тарелки, с использованием домена «пористый слой». По результатам расчета получена визуализация гидродинамики на полотне тарелки.

С помощью программного комплекса ANSYS CFX было проведено исследование гидродинамики и получены значения пере-

пада давления на тарелке. Представлена визуализация перепада давления на массообменной тарелке.

Изменяя степень загрязнения полотна тарелки (т.е. изменяя параметры «пористого слоя»), была получена зависимость перепада давления от степени загрязнения.

Полученная зависимость представлена на графике. По графику была аппроксимирована функция, описывающая эту закономерность.

Данная методика может быть использована не только для моделирования движения пара через полотно массообменной тарелки, но и через любую перфорированную поверхность.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Ерофеев В.В., Шарафиев Р.Г., Абдрахманов Н.Х., Макаров Л.В., Тимергалиев И.З. Обеспечение промышленной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса Российской Федерации // Актуальные проблемы безопасности современной России: региональный аспект: матер. науч.-техн. конф. Уфа, 2017. С. 105–115.
2. Ризванов Р.Г., Миргадиев Д.И. Улучшение технологии сборки колонных аппаратов // Актуальные проблемы науки и техники: матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Уфа, 2015. С. 152–154.

3. Файзуллина Л.Т., Туманова Е.Ю. Моделирование течения потока газа через насыпной материал с исследованием гидродинамики // Наука. Технология. Производство — 2017. Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств: матер. Международ. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. 558 с.
4. 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 выступлений IX Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Уфа: УГНТУ, 2016. С. 26–28.

5. Файзуллина Л.Т., Туманова Е.Ю. Численное моделирование гидродинамики потока в слое адсорбента // Башнефть — 2016: сб. тез. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2017. С. 271–275.

6. Воскресенский А.К., Обливин А.Н., Сагал С.З. Гидродинамические характеристики пористых тел // Вопросы теплопередачи: тр. Московского лесотехнического ин-та. М., 1981. Вып. 130. С. 5–21.

7. Дербунувич Г.И., Земская А.С., Репик Е.У., Соседко Ю.П. Гидравлическое сопротивление перфорированных решеток // Ученые записки ЦАГИ. 1984. Т. 15. № 2. С. 114–118.

8. Пелевин Ф.В. Гидравлическое сопротивление пористых металлов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 42–52.

9. Имаев О.Г., Туманова Е.Ю. Моделирование гидродинамики жидкости на клапанных тарелках для оценки влияния ориентирования их полотен // Наука. Технология. Производство — 2017. Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2017. 558 с.

10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

## REFERENCES

1. Erofeev V.V., Sharafiev R.G., Abdrakhmanov N.Kh., Makarov L.V., Timergaliev I.Z. Obespechenie promyshlennoi bezopasnosti ob"ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii [Ensuring Industrial Safety of Objects of Fuel and Energy Complex of the Russian Federation]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy bezopasnosti sovremennoi Rossii: regional'nyi aspekt»* [Materials of the Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Security of Modern Russia: Regional Aspect»]. Ufa, 2017. pp. 105–115. [in Russian].

2. Rizvanov R.G., Mirgadiyev D.I. Uluchshenie tekhnologii sborki kolonnykh apparatov [Improving the Technology of Assembly of Column Devices]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy nauki i tekhniki»* [Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Actual Problems of Science and Technology»]. Ufa, 2015. pp. 152–154. [in Russian].

3. Faizullina L.T., Tumanova E.Yu. Modelirovanie techeniya potoka gaza cherez nasypnoi material s issledovaniem gidrodinamiki [Simulation of Gas Flow Through Bulk Material with the Study of Hydrodynamics]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo — 2017. Prikladnaya nauka kak instrument razvitiya neftekhimicheskikh proizvodstv»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Science. Technology. Production — 2017. Applied Science as a Tool for the Development of Petrochemical Industries»]. Ufa, USPTU Publ., 2017. 558 p. [in Russian].

Production — 2017. Applied Science as a Tool for the Development of Petrochemical Industries»]. Ufa, USPTU Publ., 2017. 558 p. [in Russian].

4. Asylkaev R.D., Tumanova E.Yu., Chetvertkova O.V. CFD-modelirovanie gidrodinamiki zhidkosti v ulitochno-go tipa ustroistve vvoda potoka v kolonnu [CFD-Simulation of Fluid Hydrodynamics in a Snail-Type Device for Entering a Flow into a Column]. *Sbornik statei dokladov i vystuplenii IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy nauki i tekhniki — 2016»* [Collection of Articles of Reports and Speeches of the IX International Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Actual Problems of Science and Technology — 2016»]. Ufa, USPTU Publ., 2016. pp. 26–28 [in Russian].

5. Faizullina L.T., Tumanova E.Yu. Chislennoe modelirovanie gidrodinamiki potoka v sloe adsorbenta [Numerical Simulation of Flow Hydrodynamics in the Adsorbent Layer]. *Sbornik tezov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «BASHNEFT — 2016»* [Collection of Abstracts of Scientific and Technical Conference «BASHNEFT — 2016»]. Ufa, USPTU Publ., 2017. pp. 271–275. [in Russian].

6. Voskresenskii A.K., Oblivin A.N., Sagal' S.Z. Gidrodinamicheskie kharakteristiki poristykh tel [Hydrodynamic Characteristics of Porous Bodies]. *Trudy Moskovskogo lesotekhnicheskogo instituta «Voprosy teploperedachi»* [Proceedings of the Moscow State Forest University «Heat Transfer Issues»]. Moscow, 1981. Issue 130. pp. 5–21. [in Russian].

7. Derbunovich G.I., Zemskaya A.S., Repik E.U., Sosedko Yu.P. Gidravlichesкое soprotivlenie perforirovannykh reshetok [Flow Resistance of Perforated Plates]. *Uchenye zapiski TsAGI — Scientific Notes of TsAGI*, 1984, Vol. 15, No. 2, pp. 114–118. [in Russian].

8. Pelevin F.V. Gidravlichesкое soprotivlenie poristykh metallov [Hydraulic Resistance of Porous Metals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie MGTU im. N.E. Baumana — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, pp. 42–52. [in Russian].

9. Имаев О.Г., Туманова Е.Ю. Моделирование гидродинамики жидкости на клапанных тарелках для оценки влияния ориентирования их полотен [Simulation of Fluid Hydrodynamics on Valve Plates to Assess the Influence of Orientation of Their Canvases]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo — 2017. Prikladnaya nauka kak instrument razvitiya neftekhimicheskikh proizvodstv»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Science. Technology. Production — 2017. Applied Science as a Tool for the Development of Petrochemical Industries»]. Ufa, USPTU Publ., 2017. 558 p. [in Russian].

10. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Hydraulic Resistance Guide]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p. [in Russian].

ОБ АВТОРАХ  
ABOUT THE AUTHORS

**Галкин Павел Алексеевич**, магистрант кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

**Pavel A. Galkin**, Undergraduate Student of Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: Galkin.p.a@yandex.ru

**Туманова Елена Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

**Elena Yu. Tumanova**, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor Oil Processing Equipment Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: tumanova-elena@mail.ru

**Галкина Оксана Яковлевна**, магистрант кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

**Oksana Ya. Galkina**, Undergraduate Student of Fire and Industrial Safety Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: oshamidanova@bk.ru