

Ю. В. Измайлов (магистрант) ^а, Т. И. Маннанов (к.т.н. доц.) ^а, С. К. Чуракова (д.т.н., проф.) ^а,
Н. С. Шулаев (д.т.н., проф.) ^б, Б. С. Жирнов (д.т.н., проф.) ^в

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НЕОРОШАЕМЫХ КОЛПАЧКОВЫХ ТАРЕЛОК С РЕЗУЛЬТАТАМИ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

^а кафедра «Нефтехимия и химическая технология»,

^б кафедра «Информатика, математика и физика»,

^в кафедра «Химико-технологические процессы»

450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: iura.izmajloff@yandex.ru

Yu. V. Izmaylov, T. I. Mannanov, S. K. Churakova, N. S. Shulaev, B. S. Zhirnov

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL PRESSURE DIFFERENTIAL OF UNI-IRRIGATED BUBBLE CAP TRAYS WITH CFD MODELING RESULTS

Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: iura.izmajloff@yandex.ru

Представлены результаты измерений перепада давления для различных расходов подаваемого в колонну воздуха на экспериментальном стенде для тарелки с сухими приемными карманами и для тарелки с заполненными переливными карманами. Показано, что перепад давления для данных случаев отличается на 3.47–9.38 %. Проведено математическое моделирование гидродинамики неорошаемых колпачковых тарелок в среде ANSYS CFX с применением модели турбулентности $k-\epsilon$. Получена модель, обладающая достаточно высокой сходимостью к данным физического эксперимента, которая может быть применена для дальнейших исследований гидродинамики колпачковых тарелок.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление; колпачковая тарелка; лабораторный стенд; массообменная колонна; приемные карманы; расход воздуха; сравнение методов исследования; физическое моделирование; CFD-анализ; 3D-моделирование

Массообменное оборудование широко применяется в нефтеперерабатывающей, химической и пищевой промышленности. Материальный баланс колонны и качество получаемых продуктов разделения в массообменных процессах напрямую зависит от работы контактных устройств, в связи с чем исследование работы контактных устройств является важной и актуальной задачей ¹.

The results of pressure drop measurements for various air flow rates supplied to the column on an experimental stand for trays with dry inlet sumps and for trays with filled inlet sumps are presented. It is shown that the pressure drop for these cases differs by 3.47–9.38 %. Mathematical modeling of the hydrodynamics of non-dripping bubble-cap trays in the ANSYS CFX environment using the $k-\epsilon$ turbulence model is carried out. A model with a sufficiently high convergence to the data of a physical experiment has been obtained, which can be used for further studies of the hydrodynamics of bubble-cap trays.

Key words: air flow rate; bubble cap tray; 3D modeling; CFD analysis; comparison of research methods; hydraulic resistance; inlet sumps; laboratory stand; mass transfer column; physical modeling

Колпачковые тарелки – один из видов внутренних устройств перекрестноточного типа для массообменных колонн. Данный тип контактных устройств имеет широкое применение, так как на этих тарелках исключается возможность провала жидкости, вследствие чего они имеют очень широкий диапазон устойчивой работы, но при этом они обладают высоким гидравлическим сопротивлением. Колпачковые тарелки имеют сравнительно высокий КПД, что позволяет снизить капитальные затраты на сооружение колонны за

Дата поступления 28.06.25

счет уменьшения числа реальных контактных устройств и высоты аппарата ².

Колпачковые тарелки имеют множество вариантов и способов повышения эффективности их работы. Основными направлениями модернизации являются: повышение диапазона устойчивой работы, понижение металлоемкости оборудования, увеличение КПД устройства, уменьшение гидравлического сопротивления ². Все эти показатели влияют на экономическую составляющую производства. Повышение диапазона устойчивой работы необходимо для более эффективного ведения технологического процесса, быстрого пуска колонны, устойчивости к повышению или понижению нагрузок по пару или жидкости. В работе ³ предлагается увеличивать диапазон устойчивой работы колпачковых тарелок за счет возможности передвижения колпачка вдоль своей оси при повышенных паровых нагрузках. Понижение металлоемкости оборудования достигается за счет упрощения конструкции и оптимизации процесса изготовления изделия ⁴. Повышение КПД устройства достигается при увеличении площади контакта фаз, за счет увеличения рабочего сечения тарелок ⁵. Снижение гидравлического сопротивления может быть достигнуто за счет увеличения сечения прохода газа, однако, у такого способа есть недостаток: уменьшение эффективности массообмена из-за снижения турбулизации потоков ⁶. Таким образом, существует значимая взаимосвязь между эффективностью работы колпачковой тарелки и гидродинамическими характеристиками, что обосновывает актуальность задачи моделирования происходящих на тарелке гидродинамических явлений.

Целью данной работы является изучение зависимости гидравлического сопротивления от скорости подачи газа на тарелку при выполнении физического эксперимента, а также разработка математической модели с применением методов CFD-анализа. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. Физический эксперимент дает наиболее полную и точную информацию об исследуемом объекте, однако это требует специализированного оборудования и затрат времени на проведение эксперимента ⁷. В свою очередь, математическое моделирование с применением специализированного программного обеспечения (компьютерное моделирование методом CFD-анализа) позволяет получить данные о гидродинамических условиях без исследовательского стенда, однако, компьютерная модель требует подтверждения адекватности за счет экспериментов ⁸. Также к достоинствам компьютерного моделирования можно отнести отсутствие ограниче-

ний, связанных с составом рабочей среды и с характеристиками применяемого оборудования, такими как: габариты аппаратов, мощность компрессора или насоса, и т.д.

Материалы и методы

В данной работе сравнивались показатели перепада давления в неорошаемой колонне с колпачковыми тарелками с пустыми и заполненными водой переливными карманами. Исследования проводились на исследовательском стенде, фотография которого приведена на рис. 1, и методом моделирования в ANSYS CFX. Стенд представляет из себя колонный аппарат, снабженный двумя колпачковыми тарелками с 10 колпачками, переливными трубами и приемными карманами, которые при заполнении водой представляют собой систему гидрозатворов, препятствующих движению газа в обход колпачков. Диаметр колонны составляет 200 мм ⁹. Для получения информации на стенде установлено два датчика давления: под нижней тарелкой и над верхней тарелкой, а также установлен микроконтроллер, который автоматически выводит показания перепада давления на дисплей ⁹. Фотография исследуемой колпачковой тарелки приведена на рис. 2. Расход воздуха измерялся с помощью диафрагмы, установленной на подаче в колонну. Нами были проведены эксперименты с целью получения данных о перепаде давления на колонне. В результате получен ряд точек перепада давления для каждого фиксированного расхода воздуха.



Рис. 1. Лабораторный стенд с колпачковыми тарелками



Рис. 2. Исследуемая колпачковая тарелка

Для компьютерного моделирования построена 3D модель лабораторного стенда с применением программного обеспечения КОМПАС-3D, приведенная на рис. 3.

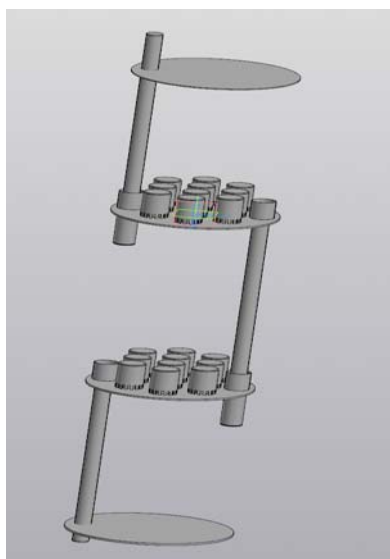


Рис. 3. 3D-модель тарельчатой колонны (стенки корпуса условно не показаны)

Расчеты в программном обеспечении ANSYS CFX проведены для ряда точек с фиксированными расходами воздуха, соответствующими физическому эксперименту. В качестве рабочей среды принят воздух при 25 °С. В ходе моделирования были опробованы разные модели турбулентности: *Shear Stress Transport*, *Generalized $k-\Omega(\omega)$* , *BSL EARSM*¹⁰, доступные в программе ANSYS. В качестве модели турбулентности была выбрана модель $k-\epsilon$, так как она показала наилучшие результаты сходимости с реальными данными, что подтверждается в аналогичных работах по моделиро-

ванию гидродинамики тарельчатых контактных устройств^{11–13}.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований проведены стендовые испытания колпачковой тарелки для случая с незаполненными водой (сухими) приемными карманами тарелок. В процессе проведения экспериментов мощность воздухоудвки фиксировалась на 9 точках. Выполнено CFD-моделирование, проведено сравнение значений перепада давления для стенда и рассчитанного значения в ANSYS CFX. Результаты экспериментов и моделирования приведены в табл. 1. Как видно, погрешность составляет 0.63–2.49 %.

На втором этапе исследований были проведены эксперименты на стенде с заполненными водой приемными карманами тарелок, в результате зафиксировано повышение перепада давления на колонне по сравнению с данными, полученными на первом этапе исследований. Этот эксперимент необходим для более точного определения перепада давления непосредственно на колпачках, исключая байпас воздуха через переливные трубы. Как видно на рис. 4, поток воздуха не попадает в переливную трубу. Полученные на стенде и в результате моделирования значения перепада давления приведены в табл. 2. Отклонение гидравлического сопротивления компьютерной модели от показаний стенда составили 2.47–7.63 %.

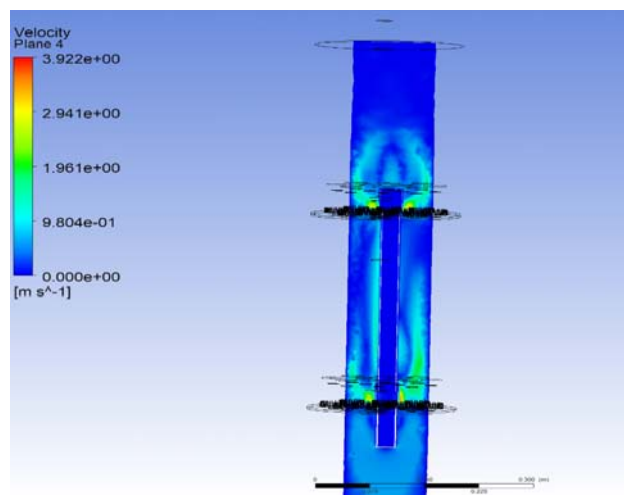


Рис. 4. Распределение скорости воздуха в объеме для варианта с заполненными переливными карманами

Также было проведено сравнение перепада давления, зафиксированного на стенде для случаев с сухими и заполненными водой переливными карманами. Зависимости перепада давления от расхода воздуха для этих случаев показаны на рис. 5.

Перепад давления колпачковых тарелок с сухими приемными карманами

№	Расход воздуха, кг/с	Перепад давления, зафиксированный на стенде, Па	Перепад давления, рассчитанный в ANSYS, Па	Погрешность модели, %
1	0.0089	71	71.45	0.63
2	0.0130	145	146.70	1.16
3	0.0169	251	244.90	2.49
4	0.0212	380	383.10	0.81
5	0.0256	567	556.40	1.91
6	0.0297	740	746.80	0.91
7	0.0331	944	926.20	0.92
8	0.0372	1179	1167.00	1.03
9	0.0424	1530	1515.00	0.99

Перепад давления колпачковых тарелок с заполненными водой приемными карманами

№	Расход воздуха, кг/с	Перепад давления, зафиксированный на стенде, Па	Перепад давления, рассчитанный в ANSYS, Па	Погрешность модели, %
1	0.0089	75	79.5	5.66
2	0.0130	160	166.6	3.96
3	0.0168	269	275.8	2.47
4	0.0211	416	432.4	3.79
5	0.0255	597	629.2	5.12
6	0.0294	781	834.1	6.37
7	0.0332	995	1062.0	6.31
8	0.0371	1223	1324.0	7.63
9	0.0420	1585	1694.0	6.43

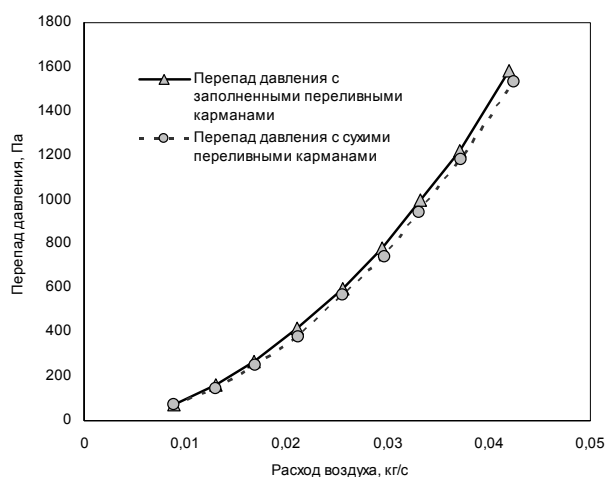


Рис. 5. Зависимость перепада давления от расхода воздуха на стенде с сухими и заполненными водой приемными карманами тарелок

Гидравлическое сопротивление колонны увеличилось для варианта с заполненными приемными карманами на 3,47–9,38 % по сравнению с вариантом с сухими приемными карманами. Это связано с тем, что в случае отсутствия воды в приемных карманах тарелки часть воздуха движется через переливную трубу мимо колпачков, соответственно, снижается расход воздуха через колпачки и гидравлическое сопротивление тарелки в целом. Для вычисления гидравлического сопротивления и коэффициента местного сопротивления тарелки это может быть важным аспектом, который необ-

ходимо учитывать при разработке моделей тарельчатых контактных устройств.

В результате работы, методами физического и математического (компьютерного) моделирования получены зависимости гидравлического сопротивления неорошаемой колонны, состоящей из двух колпачковых тарелок, от расхода подаваемого воздуха. Гидравлическое сопротивление колонны с заполненными водой переливными карманами выше, чем с незаполненными приемными карманами на 3,47–9,38 %. При исследовании гидродинамики сухих неорошаемых тарелок на стенде важно обеспечивать заполнение приемного кармана тарелок жидкой фазой, для получения корректного значения гидравлического сопротивления перекрестноточных тарельчатых контактных устройств. Для варианта с тарелками с сухими, незаполненными водой, переливными карманами погрешность компьютерной модели относительно данных эксперимента составила 0,63–2,49 %, для варианта с заполненными водой гидрозатворами погрешность составила 2,47–7,63 %.

Таким образом, нами получена математическая (компьютерная) модель исследовательского стенда с колпачковыми тарелками, обладающая высокой сходимостью к результатам физического эксперимента на исследовательском стенде, которая может применяться для выполнения дальнейших исследований гидродинамики колпачковых тарелок.

Литература

1. Чуракова С.К. Классификации контактных устройств с точки зрения организации контакта фаз // Баш. хим. ж. – 2011. – Т.18, №2. – С.39-44.
2. 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.
3. Патент №176822 РФ. Колпачковая тарелка / А.Б. Голованчиков, В.А. Балашов, К.В. Черикова // Б.И. – 2018. – №4.
4. Патент №2481876 РФ. Контактный элемент колпачковой тарелки // Н.М. Ахметзянов, Н.Н. Ахметзянов, М.И. Фарахов, В.А. Кузнецов, Т.М. Фарахов // Б.И. – 2013. – №14.
5. Патент №2602113 РФ. Колпачковая тарелка / Р.Н. Бахтизин, Н.К. Криони, А.Д. Мингажев, И.Р. Кузеев, М.И. Баязитов // Б.И. – 2016. – №31.
6. Taleb Zarei, Ehsan Abedini, Rahbar Rahimi, Jamshid Khorshidi Computational fluid dynamics on the hydrodynamic characteristics of the conical cap tray / / Korean J. Chem. Eng. – 2017. – V.34. – Pp.969-976.
7. Галкин П.А., Туманова Е.Ю., Галкина О.Я. Определение зависимости перепада давления на массообменной тарелке колонного аппарата от степени загрязнения полотна тарелки методом CFD-моделирования // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т.17, №3. – С.120-125.
8. Яшин В.Е., Равичев Л.В., Трушин А.М. Моделирование пенного слоя на противоточной тарелке методом вычислительной гидродинамики // Химическая промышленность сегодня. – 2023. – №3. – С.38-45.
9. Электронный ресурс <https://ckpr.ru/katalog/laboratory-setup/kompleksnaya-laboratornaya-ustanovka-dlya-issledovaniya-gidrodinamicheskix-yavlenij-v-tarelchatyix-i-nasadochnyix-apparatax-i-teplo-massobmena-po-ispareniyu-na-kontaktnyix-elementax-kolonnyix.html>. Дата обращения: 21.07.2025
10. Калимуллин Р.Р., Яминова Е.М., Шестерякова Н.В. Выбор модели турбулентности при моделировании вихревого течения жидкости в теплогенераторе // Гидравлика. – 2016. – №1. – С.60-66.
11. Ma Y. et al. CFD gas-liquid simulation of oriented valve tray // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2015. – V.23, №10. – Pp.1603-1609.
12. Jin H. et al. Parameters measurement of hydrodynamics and CFD simulation in multistage bubble columns // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2014. – V.92, №8. – Pp.1444-1454.
13. Shenastaghi F.K. et al. CFD simulation and experimental validation of bubble cap tray hydrodynamics // Separation and Purification Technology. – 2018. – V.192. – Pp.110-122.

References

1. Churakova S.K. *Klassifikatsii kontaktnykh ustroystv s tochki zreniya organizatsii kontakta faz* [Classification of contact devices in terms of phase contact organization]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2011, vol.18, no.2, pp.39-44.
2. Zakharova D.N., Vil'danov F.Sh., Akhmetov R.F., Rakhimov T.Kh., Churakova S.K. CFD-analiz sitchatoy tarelki [CFD analysis of a sieve tray]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2019, vol.26, no.2, pp.121-126.
3. Golovanchikov A.B., Balashov V.A., Cherkova K.V. *Kolpachkovaya tarelka* [Bubble cup tray]. Patent RF no.176822, 2018.
4. Akhmetzyanov N.M., Akhmetzyanov N.N., Farakhov M.I., Kuznetsov V.A., Farakhov T.M. *Kontaktnyi element kolpachkovoy tarelki* [Contact element of the bubble cap tray]. Patent RF no.2481876, 2013.
5. Bakhtizin R.N., Krioni N.K., Mingazhev A.D., Kuzeev I.R., Bayazitov M.I. *Kolpachkovaya tarelka* [Bubble cup tray]. Patent RF no.2602113, 2016.
6. Taleb Zarei, Ehsan Abedini, Rahbar Rahimi, Jamshid Khorshidi [Computational fluid dynamics on the hydrodynamic characteristics of the conical cap tray]. *Korean J. Chem. Eng.*, 2017, vol.34, pp. 969-976.
7. Galkin P.A., Tumanova E.Yu., Galkina O.Ya. *Opreделение zavisimosti perepada davleniya na massobmennoy tarelke kolonnogo apparata ot stepeni zagryazneniya polotna tarelki metodom CFD-modelirovaniya* [Determination of the pressure drop on the mass transfer plate of a column apparatus as a function of the degree of plate contamination using CFD modeling]. *Neftgazovoe delo* [Oil and gas business], 2019, vol.17, no.3, pp.120-125.
8. Yashin V.E., Ravichev L.V., Trushin A.M. *Modelirovanie pennogo sloya na protivotochnoy tarelke metodom vychislitel'noi gidrodinamiki* [CFD-modelling of counterflow sieve trays]. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [The chemical industry today], 2023, no.3, pp.38-45.
9. <https://ckpr.ru/katalog/laboratory-setup/kompleksnaya-laboratornaya-ustanovka-dlya-issledovaniya-gidrodinamicheskix-yavlenij-v-tarelchatyix-i-nasadochnyix-apparatax-i-teplo-massobmena-po-ispareniyu-na-kontaktnyix-elementax-kolonnyix.html>.
10. Kalimullin R.R., Yaminova E.M., Shesteryakova N.V. *Vybor modeli turbulentnosti pri modelirovanii vikhrovogo techeniya zhidkosti v teplogeneratore* [Selection of a turbulence model for modeling the vortex flow of liquid in a heat generator]. *Gidravlika* [Hydraulics], 2016, no.1, pp.60-66.
11. Ma Y. et al. [CFD gas-liquid simulation of oriented valve tray]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol.23, no.10, pp.1603-1609.
12. Jin H. et al. [Parameters measurement of hydrodynamics and CFD simulation in multistage bubble columns]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2014, vol.92, no.8, pp.1444-1454.
13. Shenastaghi F.K. et al. [CFD simulation and experimental validation of bubble cap tray hydrodynamics]. *Separation and Purification Technology*, 2018, vol.192, pp.110-122.