

Л. М. Хайдарова (магистрант), Т. И. Маннанов (к.т.н., доц.)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ГИДРОДИНАМИКУ СИТЧАТОЙ ТАРЕЛКИ МЕТОДОМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра «Нефтехимия и химическая технология»
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов 1, e-mail: khaydarova.2001@list.ru

L. M. Khaydarova, T. I. Mannanov

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THE HYDRODYNAMICS OF A SIEVE TRAY BY CFD MODELING

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: khaydarova.2001@list.ru

Представлены результаты исследования гидродинамических процессов, протекающих на ситчатых тарелках, методом CFD-моделирования. Приведены области устойчивой работы и зависимости гидравлического сопротивления от скорости подачи газа для ситчатых тарелок с отверстиями различного диаметра, и с переливными карманами различной ширины. Показано, что изменение диаметра отверстий значительно влияют на пропускную способность тарелки по газу и по жидкости, а также на гидравлическое сопротивление. Влияние ширины переливного кармана при этом не так значительно. Обнаружено, что при работе тарелок в режиме провала жидкости увеличивается гидравлическое сопротивление тарелки, при работе тарелок в нормальном режиме зависимость гидравлического сопротивления от скорости имеет квадратичный характер.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление; массообменная колонна; CFD-моделирование; напращенность слива; область устойчивой работы; ситчатая тарелка; F-фактор

В современных химико-технологических процессах в нефтеперерабатывающей и химической промышленности ректификационные и абсорбционные колонны играют ключевую роль в разделении многокомпонентных смесей. Эффективность работы таких аппаратов во многом зависит от эффективности работы внутренних контактных устройств: тарелок или насадочных блоков¹. Эффективная и устойчивая работа тарелок достигается при определенных парожидкостных нагрузках, при которых не возникает негативных явлений, таких, как, захлебывание тарелок, провал

The article presents the results of a study of hydrodynamic processes occurring on sieve trays using CFD modeling. The zones of satisfactory operation and the dependence of hydraulic resistance on the gas supply rate for sieve trays with holes of various diameters and downcomer widths of various widths are given. It is shown that changes in the diameter of the holes significantly affect the flow capacity of the tray through gas and liquid, as well as the hydraulic resistance. The effect of the downcomer width is not so significant. It was found that when the trays are operating in the liquid weeping mode, the hydraulic resistance of the tray increases; when the trays are operating in normal mode, the dependence of hydraulic resistance on speed is quadratic.

Key words: CFD modeling; F-factor; mass transfer column; pressure drop; sieve tray; weir load; zone of satisfactory operation

или унос жидкости с тарелки. Эти нагрузки формируют область устойчивой работы, пример которой приведен на рис. 1², где можно выделить следующие негативные явления, возникающие при парожидкостных нагрузках, не соответствующих области устойчивой работы:

- унос жидкой фазы (High entrainment), чаще всего на выходе жидкости из сливного кармана, вплоть до осушения тарелки (Blowing);
- захлебывание колонны (унос значительного количества жидкой фазы при высоких скоростях пара и жидкости - Flooding);
- неравномерное распределение фаз (Phase Maldistribution), при котором пар проходит пре-

Дата поступления 25.07.25

имущественно через отверстия рядом с сливной планкой, а жидкость частично стекает вниз через отверстия рядом с входным карманом;

- повышение уровня жидкости на тарелке и запираание тарелки (Liquid Gradient), при котором энергии пара,двигающегося с малой скоростью, недостаточно для преодоления сопротивления столба жидкости на тарелке;

- режим провала жидкости на тарелке (Weeping) с максимальной точкой этого явления (Dumping).

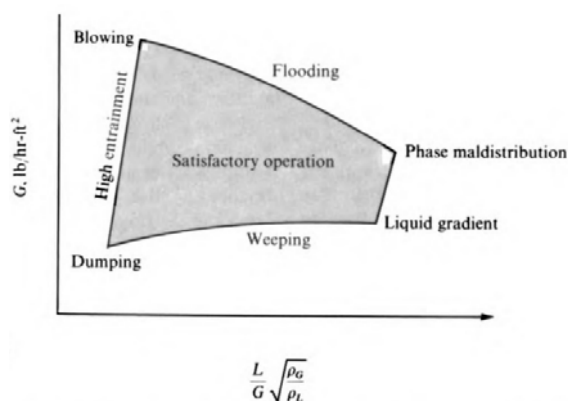


Рис. 1. Пример области устойчивой работы тарелки:
 L – удельный расход жидкости; G – удельный расход пара;
 ρ_L, ρ_G – соответственно плотности жидкости и пара

В пределах области устойчивой работы работы верхняя часть соответствует струйному режиму, а нижняя – пенному режиму².

Для моделирования гидродинамических процессов в таких системах широко используется программный комплекс ANSYS CFX. Область его применения охватывает как гидро- и газодинамические процессы, так и моделирование химических реакций. ANSYS CFX активно применяется для анализа гидродинамики различных внутренних устройств ректификационных колонн^{3–5}.

В работе⁶ исследовалось явление провала жидкости через отверстия ситчатых тарелок. Для этого использовались как численное моделирование с помощью CFD, так и эксперименты на пилотной колонне диаметром 0.5 м. Было установлено, что диаметр отверстий оказывает более значительное влияние на провал жидкости, чем процентная площадь перфорации. Также показано, что при высоких скоростях газа и различных расходах жидкости скорость провала жидкости остается практически постоянной, тогда как увеличение высоты сливной планки тарелки способствует повышению устойчивости к провалу. Также отмечается, что провал жидкости неравномерен и зависит от положения тарелки⁶.

В работе⁷ рассмотрена CFD-модель ситчатой тарелки, основанная на двух коэффициентах сопротивления, определенных эксперименталь-

ным путем. Разработана количественная модель для оптимизации направляющих отверстий, которая была протестирована на экспериментальных и промышленных установках. Установлено, что равномерное распыление газа через направляющие отверстия улучшает движение жидкости. При этом чрезмерная концентрация отверстий в одном месте может привести к утечкам. Применение такой конструкции позволило повысить эффективность ректификационной колонны на 3.29%, снизить коэффициент рефлюкса, а также добиться экономии конденсатной воды на 6.59% и пара – на 7.23%. Исходя из результатов было установлено, что ситчатые тарелки с регулируемым направлением потока демонстрируют высокую эффективность и могут быть использованы для модернизации традиционных ректификационных аппаратов⁷.

В работе⁸ с помощью ANSYS Fluent была смоделирована картина течения на ситчатой тарелке с учетом свободной поверхности жидкости. Авторы применили модель VOF (Volume of Fluid), которая позволила проследить формирование пузырей и движение капель. Полученная модель VOF показала расхождение менее чем на 5% с экспериментальными данными, в частности, погрешность профилей скоростей составили 2.86 и 10.71 % от экспериментальных.

Таким образом, исследование гидродинамики ситчатой тарелки с применением современных методов компьютерного моделирования является важной и актуальной задачей.

Исходные данные и метод моделирования

В данной работе выполнено исследование влияния диаметра отверстий и ширины сливного кармана ситчатой тарелки на ее гидравлическое сопротивление и область устойчивой работы. Геометрия устройства представлена в виде 3D-модели (рис. 2), которая разработана в программе Компас-3D. В табл. 1 представлены геометрические параметры ситчатых тарелок, для которых выполнялся CFD-анализ.

В качестве рабочих сред на тарелке используются вода и воздух при температуре 20 °С и давлении 1 атм. Моделирование гидродинамики тарелки выполнено в программе ANSYS CFX, с применением модели турбулентности $k-\epsilon$, показавшей свою адекватность при моделировании подобных процессов⁵. Для оценки гидродинамики ситчатой тарелки использовались следующие показатели:

- гидравлическое сопротивление тарелки;
- поведение сред на тарелке и наличие/отсутствие негативных эффектов, таких, как унос или провал жидкости с тарелки.

Таблица 1
Геометрические размеры ситчатых тарелок

№ модели	Диаметр отверстий, мм	Кол-во отверстий, шт.	Ширина кармана, мм	Длина переливной планки, мм
1	20	107	100	600
2	15	107	100	600
3	10	107	100	600
4	20	107	150	714
5	20	91	200	800

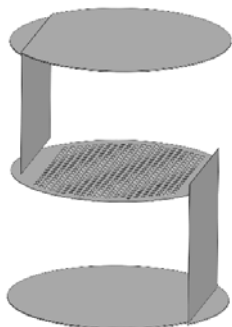


Рис. 2. 3D-модель ситчатой тарелки (корпус условно не показан): диаметр колонны 1000 мм, высота над и под тарелкой (имитирующая межтарелочное расстояние) 600 мм; высота переливной планки 50 мм; клиренс 40 мм

Результаты расчетов и их обсуждение

В результате выполнения расчетов получены области устойчивой работы ситчатых тарелок, геометрические размеры которых приведены в табл. 1. По моделям 1, 2, 3 исследовано влияние диаметра отверстий на работу ситчатых тарелок, по моделям 1, 4, 5 исследовано влияние ширины сливного кармана на работу ситчатых тарелок.

Сравнение областей устойчивой работы ситчатых тарелок с различным диаметром отверстий (рис. 3) показало, что уменьшение диаметра отверстий приводит к значительному уменьшению пропускной способности тарелок по газу (в 1.6 раз при уменьшении диаметра отверстий с 20 до 15 мм и в 3.6 раз при уменьшении диаметра отверстий с 20 до 10 мм), что связано с уменьшением сечения для прохода газа. Одновременно с этим снижается пропускная способность по жидкости (в 1.25 раз при уменьшении диаметра отверстий с 20 до 15 мм и в 1.6 раз при уменьшении диаметра отверстий с 20 до 10 мм), что можно связать с ростом гидравлического сопротивления тарелки. Таким образом, при уменьшении диаметра отверстий (без изменения их количества) снижается пропускная способность тарелки как по газу, так и по жидкости.

Превышение нагрузок по газу выше области устойчивой работы приводит к явлению уноса жидкости с тарелки. При расходе газа ниже области устойчивой работы происходит провал жидкости (рис. 4)⁹.

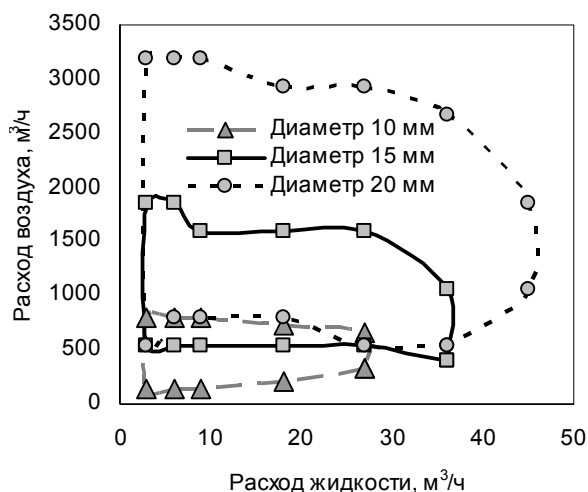


Рис. 3. Сравнение областей устойчивой работы ситчатых тарелок с различным диаметром отверстий

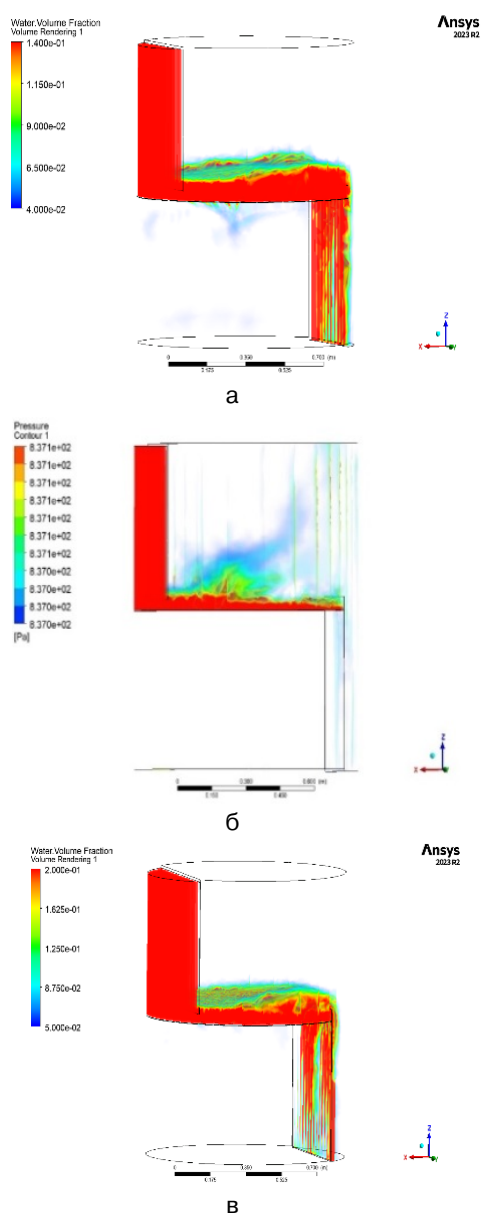


Рис. 4. Визуализация потока жидкости при режимах: а – провала жидкости; б – уноса жидкости; в – при нормальном режиме

Гидравлическое сопротивление ситчатых тарелок с разным диаметром отверстий при расходе жидкой фазы $18 \text{ м}^3/\text{ч}$ приведено на рис. 5.

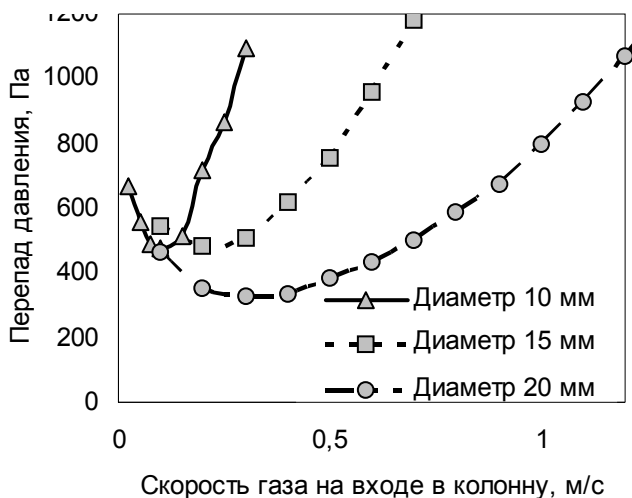


Рис. 5. Гидравлическое сопротивление ситчатых тарелок с различным диаметром отверстий (расход жидкости $18 \text{ м}^3/\text{ч}$)

Как было отмечено ранее, при уменьшении диаметра отверстий, соответственно, сечения для прохода газа, происходит увеличение гидравлического сопротивления тарелок. Например, при скорости подачи газовой фазы $0,3 \text{ м/с}$ и расходе жидкости $18 \text{ м}^3/\text{ч}$, при уменьшении диаметра отверстий с 20 до 15 мм гидравлическое сопротивление увеличивается в 1,55 раз, а при уменьшении диаметра отверстий с 20 до 10 мм гидравлическое сопротивление увеличивается в 3,34 раза (при этом превышает допустимое значение перепада давления на тарелку 1000 Па ¹⁰ и наблюдается унос жидкой фазы).

Следует обратить внимание на характер изменения зависимости перепада давления от скорости газовой фазы. Данная зависимость имеет минимум, соответствующий скорости, при котором исчезает провал жидкой фазы и начинается область устойчивой работы при увеличении скорости подачи газа, далее зависимость имеет параболический характер, соответствующий классической зависимости Дарси-Вейсбаха. Повышение перепада давления при уменьшении скорости газа ниже скорости, при которой возникает провал жидкости, связано с тем, что проваливающаяся жидкость занимает часть пространства, снижая сечение для прохода газа и повышая его локальную скорость, а также, вероятно, имеет место быть трение между газом и каплями проваливающейся жидкости. Визуализация изменения перепада давления по высоте аппарата в ANSYS CFX приведена на рис. 6.

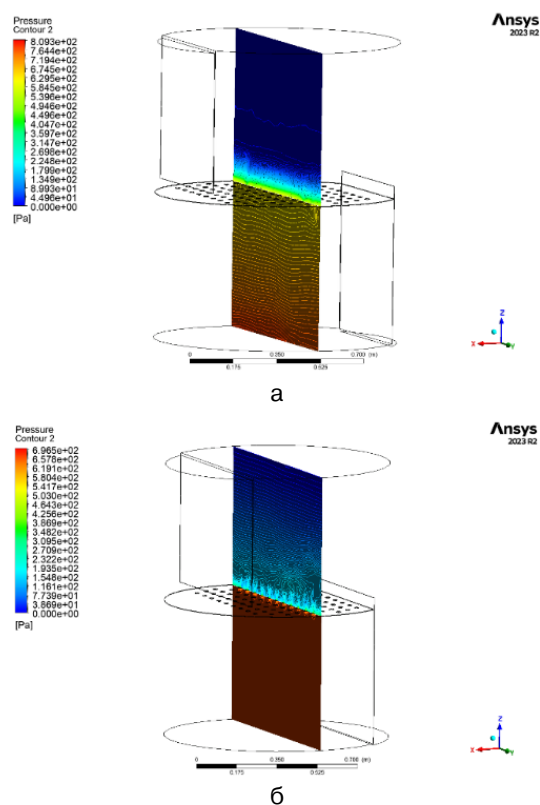


Рис. 6. Профиль изменения перепада давления по высоте колонны: а – режим провала жидкости; б – нормальный режим работы тарелки

Из рис. 7 можно увидеть, что область устойчивой работы в целом мало изменяется от ширины переливного кармана. Уменьшение пропускной способности по газу для тарелки с шириной кармана 200 мм можно связать с уменьшением количества отверстий (т.к. расстояние между отверстиями не изменялось) и уменьшением сечения для прохода газовой фазы.

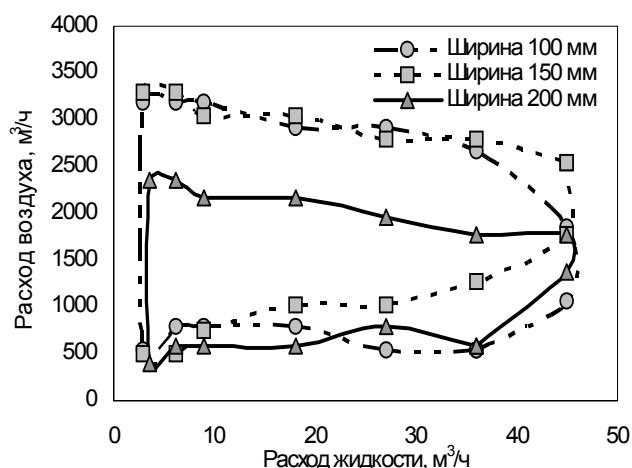


Рис. 7. Сравнение областей устойчивой работы ситчатых тарелок с различной шириной переливного кармана

При этом пропускная способность по жидкой фазе не изменилась, как для вариантов с уменьшенным диаметром отверстий. Это можно связать как с уменьшением пути жидкости по полотну тарелки, так и с увеличением сечения самого переливного кармана и длины переливной планки.

Гидравлическое сопротивление ситчатой тарелки при с различной шириной сливной планки при расходе жидкости $18 \text{ м}^3/\text{ч}$ приведено на рис. 8.

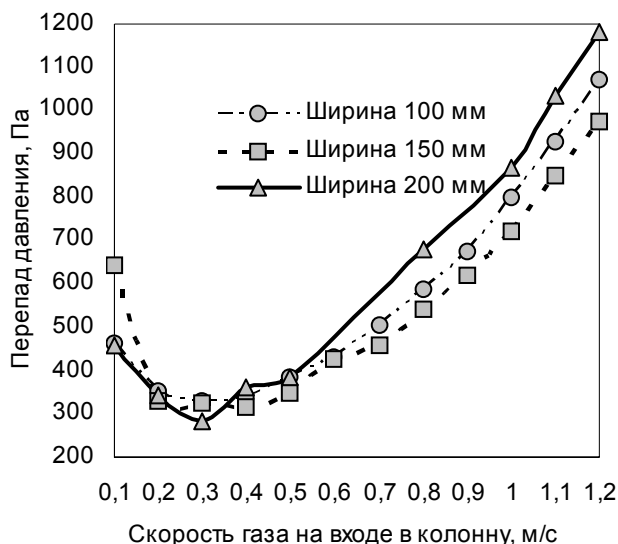


Рис. 8. Гидравлическое сопротивление ситчатых тарелок с ой шириной переливного кармана (расход жидкости $18 \text{ м}^3/\text{ч}$)

Можно отметить, что в целом гидравлическое сопротивление имеет похожие значения для тарелок с различной шириной переливного кармана, гидравлическое сопротивление для тарелки с шириной кармана 200 мм больше в 1,21 раз по сравнению с тарелкой с шириной сливного карма-

на 150 мм для максимальной скорости газа 1,2 м/с, при меньшей скорости газа отличие еще меньше. Таким образом, можно сделать вывод, что ширина переливного кармана незначительно влияет на гидравлическое сопротивление тарелки, которое в большей мере определяется скоростью газового потока в отверстиях тарелки и уровнем светлой жидкости на тарелке, которая определяется высотой сливной планки.

На следующем этапе работы выполнен расчет областей устойчивой работы тарелок с использованием не абсолютных, а удельных парожидкостных нагрузок, для возможности применения данных областей для расчета и проектирования тарелок любых размеров, отличных от принятых нами в CFD-расчетах. Традиционно для тарелок применяются такие величины удельных парожидкостных нагрузок, как F -фактор в отверстиях тарелки и напряженность слива:

$$F = \frac{V_n}{S_n} \sqrt{\rho} \quad (1)$$

где F – значение F -фактора, $\text{Па}^{0,5}$;
 V_n – объемный расход пара, $\text{м}^3/\text{с}$;
 S_n – рабочее сечение тарелки, м^2 ;
 ρ – плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$L_V = \frac{V_{ж}}{b} \quad (2)$$

где L_V – напряженность слива, $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч})$;
 $V_{ж}$ – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 b – длина переливной планки, м.

После пересчета получаем области устойчивой работы ситчатых тарелок с различным диаметром отверстий, приведенные на рис. 9.

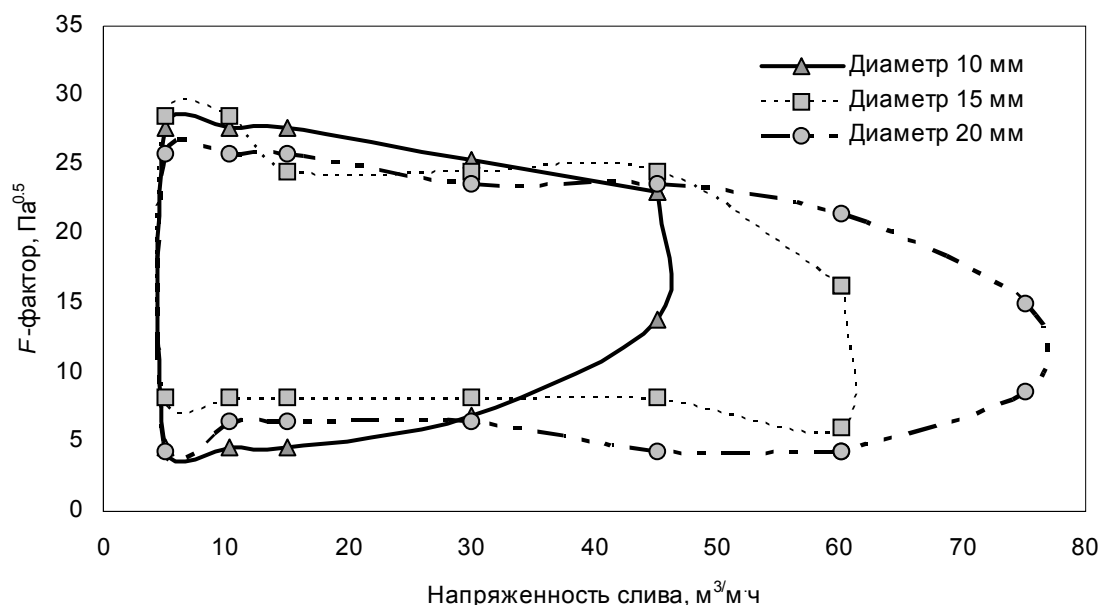


Рис. 9. Сравнение областей устойчивой работы ситчатых тарелок с различным диаметром отверстий

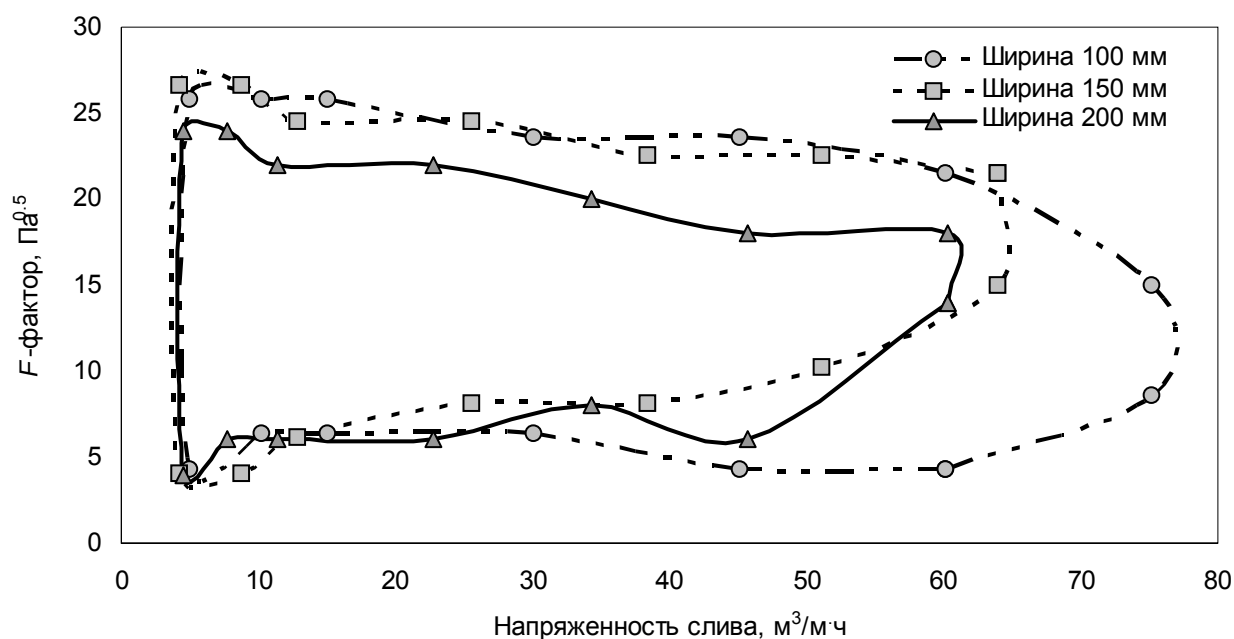


Рис. 10. Сравнение областей устойчивой работы ситчатых тарелок с различной шириной переливного кармана

Можно отметить, что области устойчивой работы ситчатой тарелки совпали по величине F -фактора в сечении отверстий, по удельной жидкостной нагрузке зависимость сохранилась – с уменьшением диаметра отверстий пропускная способность по жидкой фазе уменьшается.

После пересчета получаем области устойчивой работы ситчатых тарелок с различной шириной переливного кармана, приведенные на рис. 10.

Области устойчивой работы совпали по величине F -фактора в сечении отверстий и стали отличаться по удельной жидкостной нагрузке. Это связано с тем, что при одинаковых расходах жидкости изменилась длина сливной планки, которая учитывается при расчете напряженности слива. Пропускная способности по жидкой фазе зависит не только от длины переливной планки, но и во многом от нагрузки по газу, что подтверждается результатами гидродинамических расчетов.

По результатам CFD-моделирования ситчатой тарелки исследовано влияние диаметра отвер-

стий и ширины переливного кармана на гидродинамику ситчатых тарелок. При уменьшении диаметра тарелок снижается пропускная способность тарелок по газу и по жидкости, при этом величина F -фактора в сечении отверстий позволяет учесть эту пропускную способность. Изменение ширины переливного кармана в исследуемом диапазоне не оказало значительного влияния на область устойчивой работы. Гидравлическое сопротивление тарелок в области нормальной работы зависит от сопротивления потоку газа в отверстиях тарелки и высоты столба жидкости, при этом зависимость носит квадратичный характер. Гидравлическое сопротивление тарелок в режиме провала жидкости возрастает с уменьшением скорости газа, что связано с заполнением пространства для прохода газа проваливающейся жидкой фазой. Таким образом, повышение перепада давления при низких парожидкостных нагрузках может быть индикатором режима провала жидкости на ситчатых тарелках.

Литература

1. Воронин В.М., Игнатова Е.В. Расчет ректификационной колонны с различными контактными устройствами. – Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. – 90 с.
2. King C.J. Separation Processes. – McGraw-Hill Inc., 1980. – 850 p.
3. Маннанов Т.И., Чуракова С.К. Исследование эффективности различных конструкций устройств ввода сырья в массообменные колонны методом CFD-анализа // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2021. – №11. – С.3-6.

References

1. Voronin V.M., Ignatova E.V. *Raschet rektifikatsionnoy kolonny s razlichnymi kontaktnymi ustroystvami* [Calculation of a Rectification Column with Various Contact Devices]. Krasnoyarsk, SibSU im. M. F. Reshetneva Publ., 2021, 90 p.
2. King C.J. [Separation Processes]. McGraw-Hill Inc., 1980, 850 p.
3. Mannanov T.I., Churakova S.K. *Issledovanie effektivnosti razlichnykh konstruktsiy ustroystv vvoda syr'ya v massoobmennye kolonny metodom CFD-analiza* [Investigation of the Efficiency of Various Feed Inlet Designs in Mass Transfer Columns Using CFD Analysis].

4. Маннанов Т.И., Чуракова С.К. Исследование насадочных каплеотбойных устройств методом CFD-анализа // Химия и технология топлив и масел. – 2022. – №3 (631). – С.53-56.
5. 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.
6. Rahimi R., Rahimi M.R., Shahraki F., Zivdar M. Efficiencies of sieve tray distillation columns by CFD simulations// Chemical Engineering & Technology. – 2006. – №29. – Pp.326-335.
7. Hongkang Z., Qunsheng L., Gangqiang Y., Chengna D., Zhigang L. Performance analysis and quantitative design of a flow-guiding sieve tray by computational fluid dynamics // AiChE journal. – 2019. – V.65, №5.
8. Malvin A., Chan A., Phei L.L. CFD study of distillation sieve tray flow regimes using the droplet size distribution technique // J Taiwan Inst Chem Eng. – 2014. – №45 (4). – Pp.1354-1368.
9. Маннанов Т.И., Чураков В.А., Чуракова С.К. CFD-анализ различных конструкций тангенциальных устройств ввода сырья // Булатовские чтения. – 2025. – Т.3. – С. 103-106.
10. Отраслевой стандарт ОСТ 26-01-1488-83: Аппараты колонные тарельчатые. Метод технологического и гидродинамического расчета. – 118 с.
- Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Oil & Gas Engineering], 2021, no.11, pp. 3-6.
4. Mannanov T.I., Churakova S.K. [Investigation of packed demisters using cfd analysis method]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2022, vol.58, no.3, pp.474-478.
5. Zakharova D.N., Vil'danov F.Sh., Akhmetov R.F., Rakhimov T.Kh., Churakova S.K. CFD-analiz sitchatoy tarelki [CFD Analysis of Sieve Trays]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2019, vol.26, no.2, pp.121-126.
6. Rahimi R., Rahimi M.R., Shahraki F., Zivdar M. [Efficiencies of sieve tray distillation columns by CFD simulations]. *Chemical Engineering & Technology*, 2006, no.29, pp.326-335.
7. Hongkang Z., Qunsheng L., Gangqiang Y., Chengna D., Zhigang L. [Performance analysis and quantitative design of a flow-guiding sieve tray by computational fluid dynamics]. *AiChE journal*, 2019, vol.65, no.5.
8. Malvin A., Chan A., Phei L.L. [CFD study of distillation sieve tray flow regimes using the droplet size distribution technique]. *J Taiwan Inst Chem Eng.*, 2014, no.45(4), pp.1354-1368.
9. Mannanov T.I., Churakov V.A., Churakova S.K. *CFD-analiz razlichnykh konstruksiy tangentsial'nykh ustroystv vvoda syr'ya* [CFD-analysis of various designs of tangential raw material input devices]. *Bulatovskiye chteniya* [Bulatovskie readings], 2025, vol.3, pp.103-106.
10. *Otraslevoy standart OST 26-01-1488-83: Apparaty kolonnye tarel'chatye. Metod tekhnologicheskogo i gidrodinamicheskogo rascheta* [Trayed Column Apparatus. Process and Hydrodynamic Calculation Method], 118 s.