

Д. Н. Захарова (магистрант), Ф. Ш. Вильданов (к. т. н., доц.),  
Р. Ф. Ахметов (к. т. н., доц.), Т. Х. Рахимов (асп.), С. К. Чуракова (д.т.н., проф.)

## CFD-АНАЛИЗ СИТЧАТОЙ ТАРЕЛКИ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
кафедра нефтехимии и химической технологии  
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов 1; e-mail: darzah2783@gmail.com

D. N. Zakharova, F. Sh. Vil'danov, R. F. Akhmetov, T. Kh. Rakhimov, S. K. Churakova

## CFD-ANALYSIS OF SIEVE TRAY

Ufa State Petroleum Technological University  
1, Kosmonavtov Str., 450062, Ufa, Russia; e-mail: darzah2783@gmail.com

Представлены результаты разработки модели для исследования гидродинамики ситчатой тарелки с применением метода CFD (Computational Fluid Dynamics). Моделирование осуществлялось на основе различных значений скорости газа, результаты сравнивались с экспериментальными данными и ранее полученными результатами CFD-моделирования для вышеуказанного контактного устройства. Полученные результаты имеют высокие показатели сопоставимости с экспериментальными данными. Анализ результатов моделирования показывает, что CFD можно использовать в качестве эффективного инструмента для детального исследования потоков жидкости и газа на контактных устройствах.

**Ключевые слова:** CFD; гидродинамика; моделирование; ректификация; ситчатая тарелка.

На протяжении многих лет единственным доступным методом моделирования гидравлических, тепловых и массообменных процессов являлось применение эмпирических и полумпирических методик расчета. Несмотря на преимущества полумпирических методик, по сравнению с эмпирическими, они обладают рядом недостатков, обусловленных ограниченной областью их применения и необходимостью большого количества экспериментальных данных. В качестве альтернативы данным методикам в современной науке предложены подходы, в основе которых лежит механика сплошных сред, в частности, метод вычислительной гидродинамики – CFD. Использование методов вычислительной гидродинамики позволило в последние годы достигнуть значительных успехов в изучении движения жидко-

The article presents the results of the development of a model for research the hydrodynamics of a sieve tray using the CFD (Computational Fluid Dynamics) method. The simulation was performed with varying superficial gas velocity, the results are compared with experimental data and previous results CFD-simulation for the above contact device. The results obtained are in reasonable agreement with experimental data. Based on the simulation results, it can be concluded that CFD can be used as an effective tool for the detailed study of liquid and gas flows on contact devices.

**Key words:** CFD; distillation; hydrodynamics; sieve tray; simulation.

стей и газов в технологических процессах и оборудовании<sup>1</sup>.

Отдельного внимания заслуживает исследование течения жидких и газовых сред на ситчатых тарелках. Они широко используются в ректификационных колоннах и других массообменных аппаратах. Простая конструкция тарелки обеспечивает достаточно интенсивный контакт фаз и способствует повышению эффективности массообмена. Ситчатые тарелки имеют очень простое конструктивное оформление, удобны в эксплуатации и поэтому широко распространены в газопереработке и нефтехимии. Однако, при неправильном расчете устройства, его производительность и качество разделения могут значительно ухудшаться. Поэтому моделирование контактных устройств является важной инженерной задачей.

Дата поступления 18.03.19

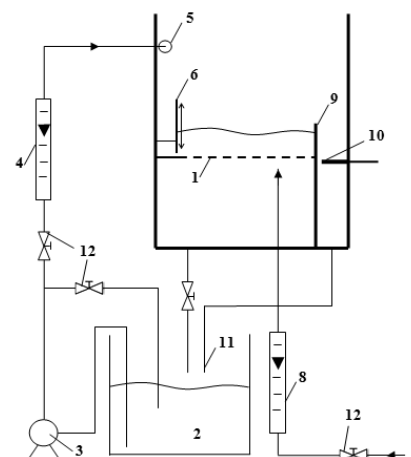
В последнее время был осуществлен ряд исследований гидродинамики ситчатых тарелок с использованием компьютерного моделирования. Так, Мехта Б.<sup>2</sup> использовал CFD-моделирование для изучения гидродинамики круглых ситчатых тарелок, что позволило существенно расширить рамки понимания работы этих устройств. Кроме него, Ю<sup>3</sup> и Лиу<sup>4</sup> исследовали гидродинамику тарелки в двухмерном пространстве, уделив основное внимание описанию гидродинамики жидкой фазы. Фишер и Кварини<sup>5</sup> разработали трехмерную CFD-модель для исследования газожидкостной гидродинамики ситчатой тарелки, где учитывался постоянный коэффициент сопротивления, равный 0.44. В последующем, Кришна<sup>6</sup> улучшил модель, введя новый коэффициент сопротивления для скопления больших пузырьков на основе корреляции Беннетта<sup>7</sup>.

Гесит<sup>8</sup> разработал трехмерную модель для исследования структуры потоков и гидродинамики круглой ситчатой тарелки с использованием корреляции Колвелла<sup>9</sup>, которая хорошо работает в режиме пенообразования. После чего Хирсхберг<sup>10</sup> разработал новую модель для двухфазного потока на тарелках колонны, где были заданы специальные граничные условия для сливных перегородок, входов и стен модели. Рахими<sup>11</sup> дополнительно разработал CFD-модель для исследования распределения температуры и концентрации как жидкой, так и паровой фаз и определил эффективность работы прямоугольных ситчатых тарелок. Норилер<sup>12</sup> предложил эйлеро-эйлеровскую модель для исследования переноса импульса, массы и тепла в многофазных потоках. Реализованная им модель позволяет прогнозировать эффективность ректификационных тарелок и определяет влияние изменения скорости и давления на эффективность их работы. Однако CFD-исследования не ограничиваются моделированием ситчатых тарелок. Также были разработаны модели для клапанных тарелок и пр.<sup>13–17</sup>.

В данной работе была разработана CFD-модель для исследования гидродинамики ситчатой тарелки в рабочих условиях. Моделирование проводилось с различной скоростью газа, результаты сравнивались с экспериментальными данными и результатами CFD-моделирования, полученными ранее в работах Р. Кришны и Дж.М. Ват Батена для системы воздух–вода<sup>6</sup>.

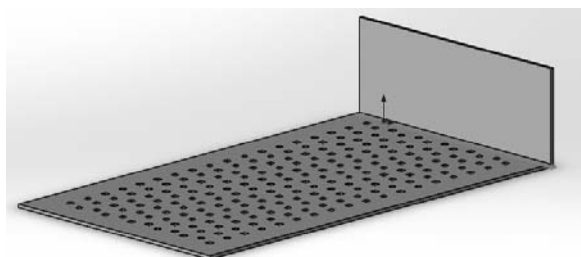
## Объекты и методы исследования

Схема экспериментальной установки, используемой в опытах Р. Кришны и Дж.М. Ват Батена, представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки<sup>6</sup>: 1 – ситчатая тарелка; 2 – резервуар для жидкости; 3 – насос; 4 – уровень; 5 – подача жидкости; 6 – переточная трубка; 7 – подача газа; 8 – расходомер; 9 – сливная перегородка; 10 – ячейка для измерения времени пребывания; 11 – выход жидкости; 12 – клапан.

Трехмерная твердотельная модель ситчатой тарелки представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Трехмерная твердотельная модель ситчатой тарелки

Характеристики и геометрические параметры тарелки представлены в табл. 1.

Таблица 1  
**Характеристики моделируемой прямоугольной ситчатой тарелки**

Параметр	Значение
Длина тарелки, м	0.39
Ширина тарелки, м	0.22
Высота сливной перегородки, м	0.8
Количество отверстий, шт.	276
Диаметр отверстий, мм	5

Для газовой (индекс  $G$ ) и жидкой (индекс  $L$ ) фаз в двухфазной системе используются следующие уравнения сохранения импульса

$$\frac{\partial(\varepsilon_G \rho_G)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_G \varepsilon_G u_G) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_L \rho_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_L \varepsilon_L u_L) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon_G \rho_G u_G)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_G \varepsilon_G u_G u_G - \mu_G \varepsilon_G (\nabla u_G + (\nabla u_G)^T)) = \\ = -\varepsilon_G \nabla p + M_{G,L} + \rho_G \varepsilon_G g \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon_L \rho_L u_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_L \varepsilon_L u_L u_L - \mu_L \varepsilon_L (\nabla u_L + (\nabla u_L)^T)) = \\ = -\varepsilon_L \nabla p + M_{G,L} + \rho_L \varepsilon_L g \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – объемная доля фазы;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $t$  – время, с;  
 $u$  – скорость, м/с;  
 $\mu$  – вязкость, Па·с;  
 $p$  – давление, Н/м<sup>2</sup>;  
 $T$  – температура, К;  
 $M$  – межфазный момент импульса, Н/м<sup>3</sup>;  
 $g$  – ускорение свободного падения, 9.81 м/с<sup>2</sup>.

В гидродинамических расчетах была использована полуэмпирическая  $k-\varepsilon$  модель турбулентности. Надежность, экономичность и точность  $k-\varepsilon$  модели для широкого спектра турбулентных потоков объясняют ее популярность. Согласно предыдущим работам<sup>18,19</sup>, использование турбулентных моделей приводит к более точным результатам, чем модель ламинарного потока для исследования сложных процессов взаимодействия газа и жидкости на контактных устройствах ректификационных тарелок.

Размеры вычислительной области составляют 0.39×0.12×0.22 м. Количество элементов конечно-элементной расчетной сетки составило 420502. Расчетная сетка, сгенерированная в модуле ANSYS Meshing, представлена на рис. 3.

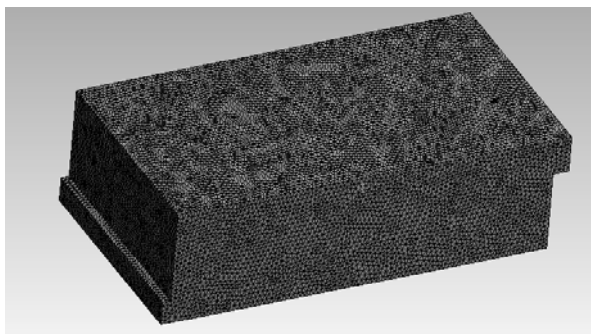


Рис. 3. Конечно-элементная расчетная сетка для ситчатой тарелки

Время симуляции работы ситчатой тарелки составило 5 секунд. Расчетная область моделирования представлена на рис. 4.

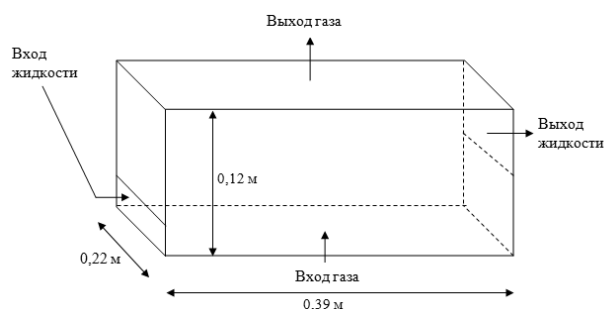


Рис. 4. Расчетная область моделирования

Современные пакеты вычислительной гидродинамики совместимы со многими ведущими САД-системами и поддерживают импорт моделей. Для моделирования течения жидкости и газа была построена твердотельная модель прямоугольной ситчатой тарелки. Созданная в САД-системе модель была импортирована в модуль ANSYS Design Modeler, где было произведено извлечение расчетного домена. Для создания расчетной сетки использовался модуль ANSYS Meshing. Для моделирования гидродинамики использовался инструмент ANSYS CFX.

## Результаты и их обсуждение

Моделирование проводилось для следующих значений скоростей газа:

$U_{G1} = 0.5$  м/с,  $U_{G2} = 0.7$  м/с,  $U_{G3} = 0.9$  м/с.  
 Расход жидкости составил  $Q = 0.494$  кг/с.

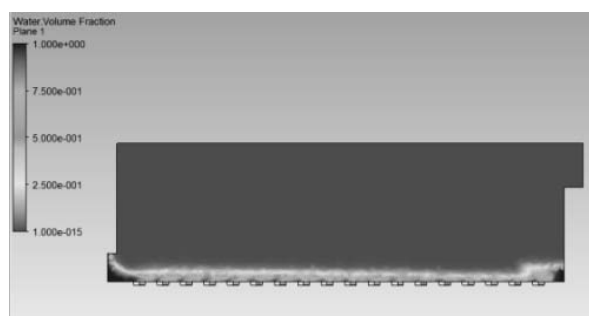
Результаты эксперимента и CFD-моделирования сравнивались на основе показателя высоты светлого слоя жидкости ( $h_0$ ). Высота светлого слоя жидкости – это высота статического слоя жидкости на плате перфорированной зоны. Она является одной из ключевых величин для расчета основных гидродинамических характеристик, в том числе составляющей  $\Delta P_{ж}$ , и интенсивности массообмена на тарелках.

Высота светлого слоя жидкости на тарелке определяется как высота жидкости, которая существовала бы на тарелке при отсутствии потока пара. Исходя из данной интерпретации, чистая высота жидкости рассчитывалась как высота системы, умноженная на среднюю объемную долю жидкой фазы. Симуляция работы тарелки при скорости 0.5 м/с представлена на рис. 5.

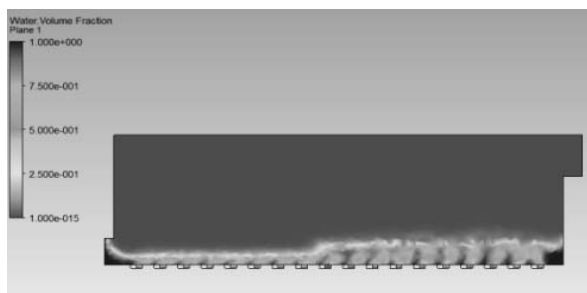
На рис. 6 приведено сравнение экспериментальных данных (высота светлого слоя



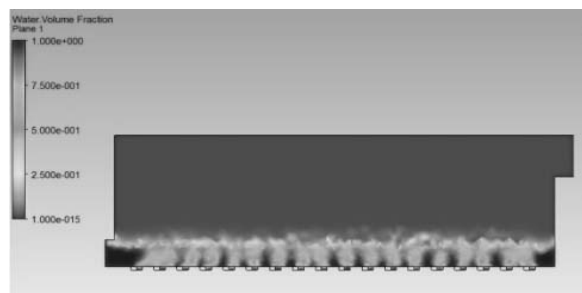
$\tau = 0$  с



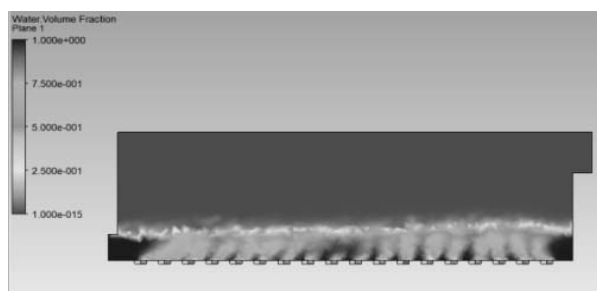
$\tau = 1$  с



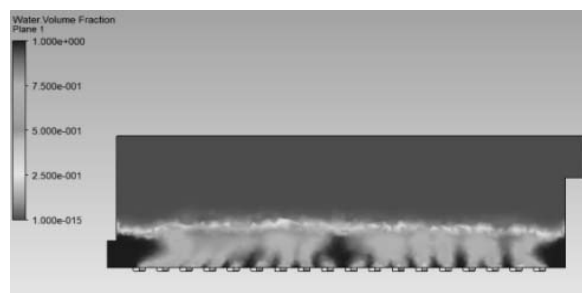
$\tau = 2$  с



$\tau = 3$  с



$\tau = 4$  с



$\tau = 5$  с

Рис. 5. Симуляция работы тарелки при  $Q=0.494$  кг/с,  $U_G=0.5$  м/с

жидкости на тарелке) с полученными результатами CFD-моделирования и результатами моделирования, полученного Р. Кришной <sup>6</sup>.

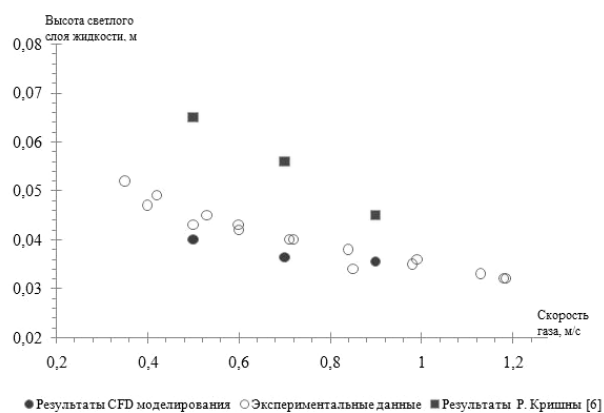


Рис.6. Сравнительный график полученных результатов CFD-моделирования с экспериментальными данными и результатами моделирования Р. Кришны

Полученные результаты CFD-моделирования показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Более того, рассчитанные значения высоты светлого слоя жидкости ближе к результатам эксперимента, чем расчетные значения, представленные в работе Р. Кришны <sup>6</sup>. То есть, проведенное нами моделирование гидродинамики дало более точные результаты. Это объясняется тем, что в настоящем исследовании было увеличено число элементов расчетной сетки. В проведенных нами расчетах оно составило 420 520 элементов, по сравнению с 82 368 элементами, представленными у Р. Кришны, то есть было выше приблизительно в пять раз. Сгущение сетки позволило увеличить точность расчетов и приблизить результаты моделирования к экспериментальным данным.

Таким образом, результаты CFD-анализа ситчатой тарелки показали хорошую сходимость с натурным исследованием и прямую зависимость качества результатов численного анализа от качества конечно-элементной расчетной сетки модели. В данной работе высокое значение качества расчетной сетки достигалось путем увеличения количества тетраэдральных элементов. В дальнейшем также возможно проведение исследований по влиянию типа элементов сетки (гекса-элементы, полиэдраль-

ные элементы) на качество расчета и затрат времени на вычисления.

Также необходимо отметить возможность замены дорогих натуральных исследований на более дешевые численные, или совместное использование натуральных экспериментов и CFD-анализа, что даст не только возможность получить необходимые данные, но и позволит лучше понять происходящие процессы в исследуемом объекте.

### Литература

1. Zarei A. Hosseini S.H., Rahimi R. CFD study of weeping rate in the rectangular sieve trays // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.*— 2013.— №44.— Pp.27-33.
2. Mehta B., Chuang K.T., Nandakumar K. Model for liquid phase flow on sieve trays // *Chemical Engineering Research and Design.*— 1998.— №76.— Pp.843-848.
3. Yu K.T., Yuan X.G., You X.Y., Liu C.T. Computational fluid dynamics and experimental verification of two-phase two-dimensional flow on a sieve column tray // *Chemical Engineering Research and Design.*— 1999.— №77.— Pp.554-560.
4. Liu C.J., Yuan X.G., Yu K.T., Zhu X.J. A fluid dynamic model for flow pattern on a distillation tray // *Chemical Engineering Science.*— 2000.— №55.— Pp.2287-2294.
5. Fischer C.H., Quarini J.L. Three-dimensional heterogeneous modeling of distillation tray hydraulics // *Miami Beach, FL: AIChE annual meeting.*— 1998.— №11.— Pp.15-20.
6. Krishna R., Van Baten J.M., Ellenberger J. CFD Simulations of Sieve Tray Hydrodynamics // *Chemical Engineering Research and Design.*— 2000.— №77.— Pp.143-151.
7. Bennett D.L., Agrawal R., Cook P.J. New pressure drop correlation for sieve tray distillation columns // *AIChE Journal.*— 1983.— №29.— Pp.434-442.
8. Gesit G.K., Nandakumar K., Chuang K.T. Modeling of flow patterns and hydraulics of commercial-scale sieve trays // *AIChE Journal.*— 2003.— №49.— Pp.910-924.
9. Colwell C. Clear liquid height and froth density on sieve trays // *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development.*— 1981.— №20.— Pp.298-307.
10. Hirschberg S., Wijn E.F., Wehrli M. Simulating the two-phase flow on column trays // *Chemical Engineering Research and Design.*— 2005.— №83.— Pp.1410-1424.
11. 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.
12. Noriler D., Meier H.F., Barros A.A.C., Macel M.R.W. Prediction of efficiencies through simultaneous momentum, mass and energy transfer analyses in a distillation sieve tray by

### References

1. Zarei A. Hosseini S.H., Rahimi R. [CFD study of weeping rate in the rectangular sieve trays]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2013, no.44, pp.27-33.
2. Mehta B., Chuang K.T., Nandakumar K. [Model for liquid phase flow on sieve trays]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1998, no.76, pp.843-848.
3. Yu K.T., Yuan X.G., You X.Y., Liu C.T. [Computational fluid dynamics and experimental verification of two-phase two-dimensional flow on a sieve column tray]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1999, no.77, pp.554-560.
4. Liu C.J., Yuan X.G., Yu K.T., Zhu X.J. [A fluid dynamic model for flow pattern on a distillation tray]. *Chemical Engineering Science*, 2000, no.55, pp.2287-2294.
5. Fischer C.H., Quarini J.L. [Three-dimensional heterogeneous modeling of distillation tray hydraulics]. *Miami Beach, FL: AIChE annual meeting*, 1998, no.11, pp.15-20.
6. Krishna R., Van Baten J.M., Ellenberger J. [CFD Simulations of Sieve Tray Hydrodynamics]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2000, no.77, pp.143-151.
7. Bennett D.L., Agrawal R., Cook P.J. [New pressure drop correlation for sieve tray distillation columns]. *AIChE Journal*, 1983, no.29, pp.434-442.
8. Gesit G.K., Nandakumar K., Chuang K.T. [Modeling of flow patterns and hydraulics of commercial-scale sieve trays]. *AIChE Journal*, 2003, no.49, pp.910-924.
9. Colwell C. [Clear liquid height and froth density on sieve trays]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1981, no.20, pp.298-307.
10. Hirschberg S., Wijn E.F., Wehrli M. [Simulating the two-phase flow on column trays]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2005, no.83, pp.1410-1424.
11. 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.
12. Noriler D., Meier H.F., Barros A.A.C., Macel M.R.W. [Prediction of efficiencies through simultaneous momentum, mass and energy transfer analyses in a distillation sieve tray by CFD technique]. *Industrial & Engineering*

- CFD technique // *Industrial & Engineering Chemistry Research*.— 2010.— №49.— Pp.6599-6611.
13. Li X.G., Liu D.X., Xu S.M., Li H. CFD simulation of hydrodynamics of valve tray // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*.— 2009.— №48.— Pp.145-151.
  14. Zarei T., Rahimi R., Zivdar M. Computational fluid dynamic simulation of MVG tray hydraulics // *Korean Journal of Chemical Engineering*.— 2009.— №26.— Pp.1213-1219.
  15. Alizadehdakhel A., Rahimi M., Alisairafi A.A. CFD and experimental studies on the effect of valve weight on performance of a valve tray column // *Computers & Chemical Engineering*.— 2010.— №34.— Pp.1-8.
  16. Rahimi R., Zarei A., Zarei T. Comprehensive research on push valves effects on sieve trays by CFD and an experimental approach // *Distillation Absorption: 50th distillation and absorption conference*.— 2010.— №50.— Pp.407-412.
  17. Jiang S., Gao H., Sun J. Modeling fixed triangular valve tray hydraulics using computational fluid dynamic // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*.— 2012.— №52.— Pp.74-84.
  18. Hosseini S.H., Shojaee S., Ahmadi G., Zivdar M. Computational fluid dynamics studies of dry and wet pressure drops in structured packings // *Industrial & Engineering Chemistry Research*.— 2012.— №18.— Pp.1465-1473.
  19. Rafati Saleh R., Hosseini S.H., Shojaee S., Ahmadi G. CFD studies of pressure drop and increasing capacity in Mellapak plus structured packing // *Chemical Engineering & Technology*.— 2011.— №34.— Pp.1402-1412.
  13. Li X.G., Liu D.X., Xu S.M., Li H. [CFD simulation of hydrodynamics of valve tray]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2009, no.48, pp.145-151.
  14. Zarei T., Rahimi R., Zivdar M. [Computational fluid dynamic simulation of MVG tray hydraulics]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2009, no.26, pp.1213-1219.
  15. Alizadehdakhel A., Rahimi M., Alisairafi A.A. [CFD and experimental studies on the effect of valve weight on performance of a valve tray column]. *Computers & Chemical Engineering*, 2010, no.34, pp.1-8.
  16. Rahimi R., Zarei A., Zarei T. [Comprehensive research on push valves effects on sieve trays by CFD and an experimental approach] *Distillation Absorption: 50th distillation and absorption conference*, 2010, no.50, pp.407-412.
  17. Jiang S., Gao H., Sun J. [Modeling fixed triangular valve tray hydraulics using computational fluid dynamic]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, no.52, pp.74-84.
  18. Hosseini S.H., Shojaee S., Ahmadi G., Zivdar M. [Computational fluid dynamics studies of dry and wet pressure drops in structured packings] *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, no.18, pp.1465-1473.
  19. Rafati Saleh R., Hosseini S.H., Shojaee S., Ahmadi G. [CFD studies of pressure drop and increasing capacity in Mellapak plus structured packing]. *Chemical Engineering & Technology*, 2011, no.34, pp.1402-1412.