



УДК 66.048.3

CFD-АНАЛИЗ – СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ В УСТРОЙСТВАХ ВВОДА СЫРЬЯ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

●●●●●

CFD ANALYSIS IS A MODERN APPROACH TO THE STUDY OF THE PROCESS OF SEPARATION AND DISTRIBUTION OF FLOWS IN RAW MATERIAL INPUT DEVICES OF MASS TRANSFER DEVICES

Маннанов Тимур Ильнурович

аспирант кафедры нефтехимии и химической технологии,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
t.i.mannanov@yandex.ru

Чуракова Светлана Константиновна

доктор технических наук, профессор,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
churakovack@rambler.ru

Лесной Денис Вячеславович

аспирант кафедры нефтехимии и химической технологии,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
denislesnoy1992@gmail.com

Константинов Егор Константинович

аспирант кафедры нефтехимии и химической технологии,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
george.coin2@gmail.com

Муллабаев Камиль Азаматович

аспирант кафедры нефтехимии и химической технологии,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
kamil200995@gmail.com

Аннотация. Приведен анализ моделей устройств ввода сырья в массообменные аппараты различных конструкций (без конструктивных элементов, с отбойником, с лопастным распределителем), полученных при помощи CFD-анализа. Показано, что в настоящее время разнообразие конструкций устройств ввода невелико, однако отсутствует общепризнанная методика их выбора и расчета. CFD-анализ гидродинамики этих устройств позволяет получить данные по распределению скоростей, температур по сечению массообменного аппарата, перепада давления в устройстве.

Ключевые слова: CFD-анализ, газожидкостной поток, лопастной распределитель, массообменный аппарат, отбойник, распределение скоростей, сепарация, сырье, устройство ввода.

Mannanov Timur Ilnurovich

Post-graduate of Department of
Petrochemistry and Chemical Technology,
Ufa State Petroleum Technological University
t.i.mannanov@yandex.ru

Churakova Svetlana Konstantinovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Ufa State Petroleum Technological University
churakovack@rambler.ru

Lesnoy Denis Vyacheslavovich

Post-graduate of Department of
Petrochemistry and Chemical Technology,
Ufa State Petroleum Technological University
denislesnoy1992@gmail.com

Konstantinov Egor Konstantinovich

Post-graduate of Department of
Petrochemistry and Chemical Technology,
Ufa State Petroleum Technological University
george.coin2@gmail.com

Mullabaev Kamil Azamatovich

Post-graduate of Department of
Petrochemistry and Chemical Technology,
Ufa State Petroleum Technological University
kamil200995@gmail.com

Annotation. The analysis of models of raw material input devices in mass transfer devices of various designs (without structural elements, with a bump, with a blade distributor) obtained using CFD analysis is presented. It is shown that currently the variety of input device designs is small, but there is no generally recognized method for selecting and calculating them. CFD analysis of the hydrodynamics of these devices allows you to obtain data on the distribution of speeds, temperatures across the cross section of the mass transfer device, and the pressure drop in the device.

Keywords: bump, CFD analysis, gas-liquid flow, input device, mass-transfer device, raw materials, Schoepentoeter, separation, speed distribution.

В данной работе рассматриваются устройства ввода сырьевых потоков в массообменные аппараты: сепараторы, ректификационные или абсорбционные колонны. Назначение вводных устройств заключается в сепарации входящего газожидкостного потока, успокоении потока,

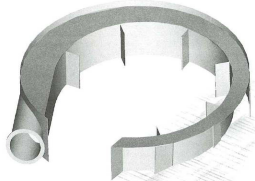
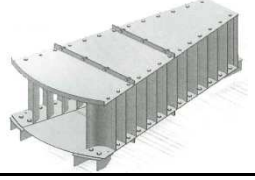
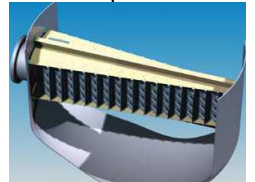




т.е. снижении разбрызгивания жидкости и недопущении ее попадания в верхнюю часть аппарата, а также распределения газового потока максимально равномерно по сечению колонны [1].

При расчетах ректификационных колонн принимается, что в зоне ввода происходит полное однократное испарение (конденсация) поступающего потока. Однако, зачастую разделение происходит не полностью, например, при высоких скоростях потока жидкость может разбрызгиваться, мелкие капельки жидкости уносятся вместе с потоком газа, а газ частично попадать в жидкость из-за растворения. В статье [2] было проведено математическое моделирование процесса ректификации, которое показало увеличение энергозатрат при ухудшении сепарации в зоне ввода, в частности, повышение теплоподвода на 7,9 % и повышение теплоотвода на 14,9 % при снижении эффективности сепарации на 30 %.

Кроме этого, в ряде случаев очень важно обеспечивать равномерное распределение газа по сечению колонны. Например, неравномерность распределения потоков через слой противоточной насадки приводит к байпасированию и, соответственно, снижению эффективности ее работы. Исследования, проведенные на стенде по изучению тарельчатых устройств, также позволил наблюдать снижение поверхности массообмена на нижней тарелке из-за неравномерности распределения газового потока [3]. Поэтому, устройства ввода сырья, наряду с тарельчатыми и насадочными контактными устройствами, являются важнейшими элементами массообменного оборудования. Однако, разнообразие конструкций входных устройств намного меньше, чем у контактных устройств. Наиболее распространенными конструкциями зон ввода являются лопастные, тангенциальные и устройства без распределителей. В таблице 1 приведены основные виды устройств ввода питания, предлагаемые отечественными и иностранными поставщиками массообменных устройств [4–7].

Таблица 1 – Основные виды устройств ввода сырья

№	Поставщик	Тип	Описание
1	2	3	4
1	Koch Glitch [4]	Vapor Horn 	Устройство ввода двухфазных потоков, с преимущественной паровой фазой. Сепарация происходит под действием центробежных сил. Внутренние способствует более равномерному распределению пара.
		Evenflow 	Устройство ввода преимущественно паровых потоков для обеспечения их равномерного распределения.
2	Sulzer [5]	Schoepentoeter 	Лопастное устройство наилучшим образом подходит для ввода паро-жидкостного питания из печи, или, например, для возврата нагретой кубовой жидкости в смеси с паром из кипятильника колонны.
3	Инжехим [6]		Применяются для предварительного сепарирования жидкости и равномерного распределения газожидкостного потока по сечению аппарата на входе массообменных колонных аппаратов.
			



Окончание таблицы 1

1	2	3	4
4	ЗАО ПИРО [7]		Узел ввода лопастной с распределителем для ввода парожидкостных смесей.

Кроме представленных в каталогах конструкций существуют узлы ввода сырья без каких-либо конструктивных элементов, а также с отбойниками. Такие конструкции приведены на рисунке 1.

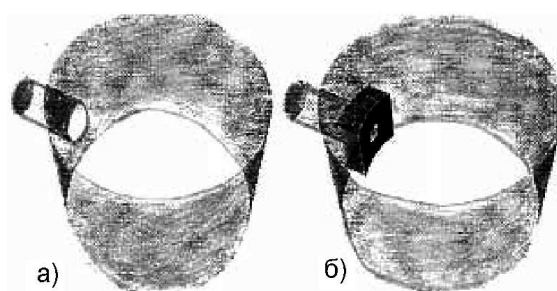


Рисунок 1 – Простые конструкции узлов ввода: а) без конструктивных элементов; б) с отбойником

В целом, основные типы узлов ввода ограничиваются представленными выше конструкциями. Как можно заметить, они недостаточно разнообразны. Кроме этого, отсутствуют типовые методики выбора узлов ввода в зависимости от свойств сырьевых потоков, технологического и конструктивного расчета. Таким образом, изучение работы узлов ввода различных конструкций, их влияние на разделение и распределение потоков является важной и актуальной задачей.

В статье [8] представлены результаты численных исследований узлов ввода, представляющих собой перфорированные трубы. Схема общего вида данных элементов представлена на рисунке 2.

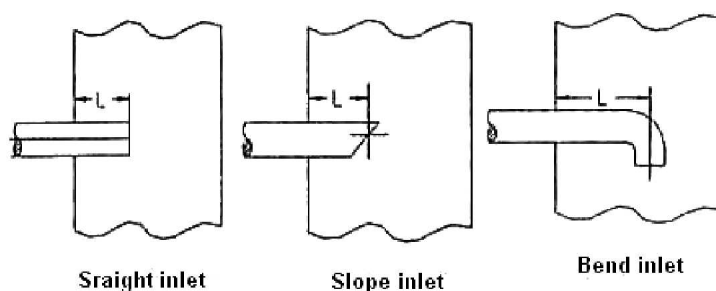


Рисунок 2 – Трубчатые входные устройства [8]

Данные виды трубок отличаются наконечником: простой, наклонный и с поворотом. Авторы статьи [8] провели компьютерное моделирование (CFD-анализ) работы этих устройств ввода при подаче газового потока со скоростью 3 м/с. Профиль скоростей по сечению приведен на рисунке 3.

Также сообщается о проведении анализа влияния длины и диаметра трубки входных устройств, а также расстояния между узлом ввода и нижней части зоны питания на распределение потока. Результаты экспериментов показывают, что равномерность потока газа в насадочной колонне зависит от диаметра трубки ввода, причем более равномерное распределение газа достигается при больших диаметрах. Большое значение имеет расстояние между трубкой ввода сырья и нижней части зоны ввода (начало насадочного слоя отгонной части колонны). Слишком короткое расстояние может привести к неравномерному потоку газа в насадочных колоннах. Выход трубки ввода сырья газа должен быть расположен в центре сечения колонны для обеспечения наиболее равномерного распределения газа.

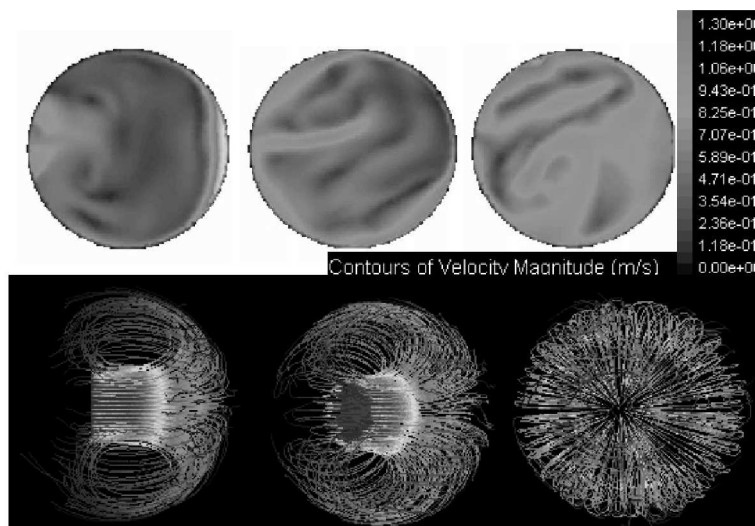


Рисунок 3 – Распределение скоростей по сечению узла ввода колонны [8]

Следует также отметить подход к моделированию процесса и оценке распределения потока газа. CFD-анализ проводился с применением пакета Fluent 6. При моделировании газовой фазы использовалась модель k-ε. Оценка распределения проводилась с применением коэффициента неравномерности (M_f), который представляет собой способность распределительного устройства выравнять поток газа. Коэффициент неравномерности распределения вычисляется в горизонтальном сечении колонны по уравнению:

$$M_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i - U_0}{U_0} \right)^2}, \tag{1}$$

где U_i – скорость газа в ячейке i (локальная скорость); U_0 – поверхностная скорость газа; n – общее число ячеек.

В статье [9] исследуется устройство ввода, состоящее из двух входных труб, а также четырехпоточный распределитель пара. Расположение входных труб приведено на рисунке 4. Ввод с применением нескольких штуцеров позволяет снизить скорость подачи сырья, улучшить распределение по сравнению с вводом через один большой штуцер. С применением модели RNG k-ε проведено моделирование подачи газожидкостной смеси через данное входное устройство. Результаты моделирования приведены на рисунках 5, 6. Скорость подачи выбрана 66,3 м/с, температура 401,3 °С для потока 1 и 58,4 м/с, 361,9 °С для потока 2.

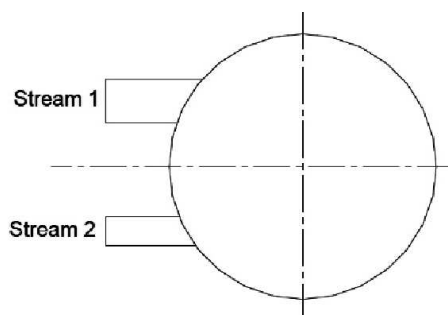


Рисунок 4 – Схема подачи сырья в массообменный аппарат [9]

Далее рассмотрим работы ученых в области моделирования сложных конструкций устройств ввода сырья. Например, одним из самых распространенных устройств является лопастной узел ввода. С незначительными конструктивными элементами это устройства поставляются компаниями Koch-Glitch (Evenflow), Sulzer (Schoerpentoeter), Инжехим и т.д. [4–6] На самом деле, существует много возможных вариаций конструкции этих устройств, например, изменение длины, угла поворота лопаток, изменения расстояния между ними, угла изгиба и т.д. Однако, нет каких-либо общепризнанных данных о влиянии этих параметров на сепарацию и распределение сырьевого потока. Также не существует общепризнанной методики расчета этих устройств.

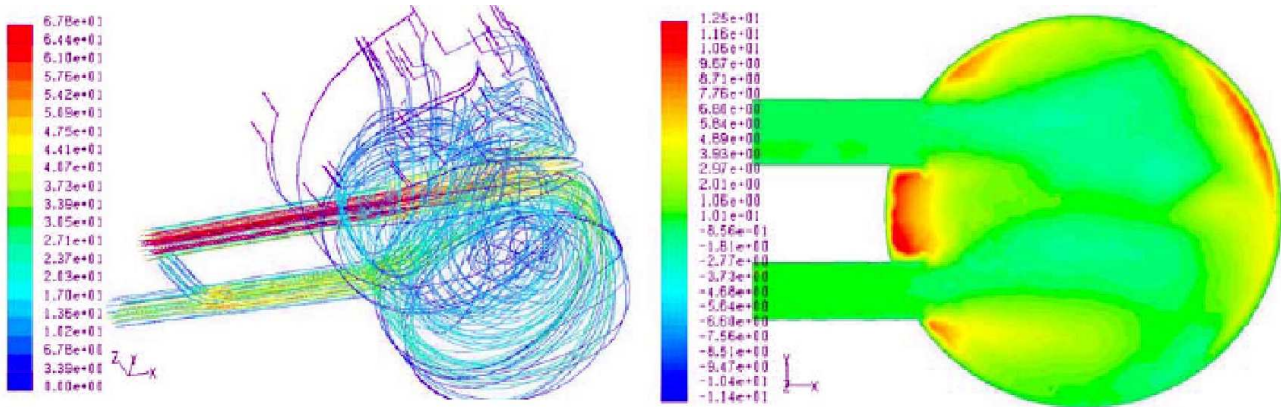


Рисунок 5 – Линии потоков и распределение скоростей в устройстве ввода [9]

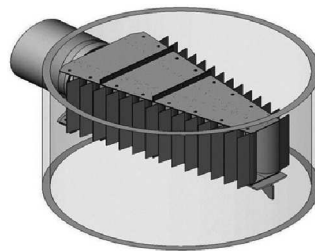


Рисунок 6 – Моделируемое лопастное устройство ввода сырья [10]

Одна из попыток получить математическую модель посредством CFD-анализа описана в статье [10]. Коллективом ученых был смоделирован процесс ввода сырья при помощи лопастного распределителя, показанного на рисунке 6. Сырье – паровая фаза, подавалась со скоростью 136,365 м/с. Как и в предыдущих случаях, применена модель турбулентности k-ε. Результаты моделирования показаны на рисунке 7.

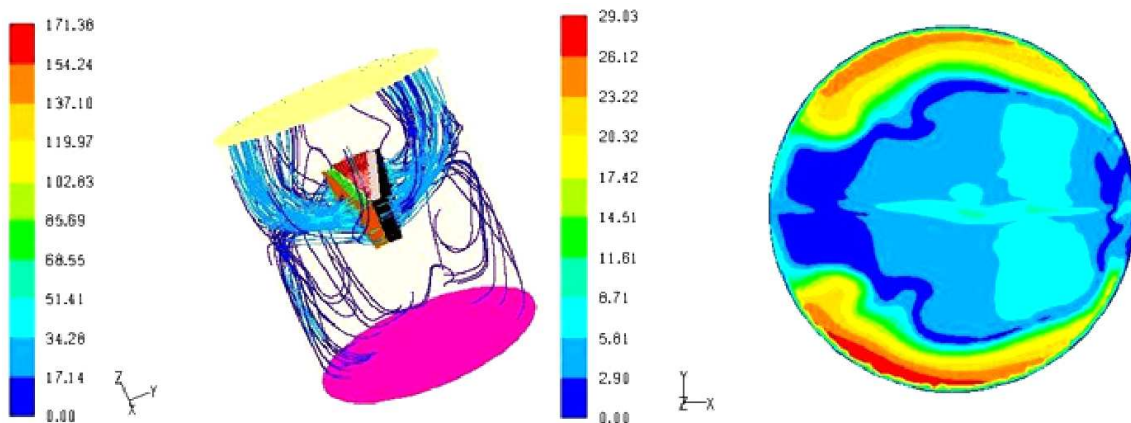


Рисунок 7 – Результаты моделирования лопастного устройства ввода парового сырья [10]

Следует отметить, что несмотря на снижение скорости пара по сечению колонны, распределение все же недостаточно хорошее. На рисунке 7 можно заметить красную область, что показывает, что пар у стенок аппарата поднимается вверх с существенно более высокой скоростью, чем в центре сечения колонны.

Одно из самых удачных устройств для ввода сырья в массообменные аппараты – узлы с тангенциальным вводом сырья. Центробежные силы позволяют более полно осуществить сепарацию потока на пар и жидкость, а также исключить проскики пара возле стенок аппарата. Такие узлы ввода в иностранной литературе называются «varog horn».

В работе [11] представлены данные по моделированию узла ввода «varog horn». Ввод сырья радиальный, поступающий поток разделяется на две части и направляется вдоль стенки колонны благодаря отбойному устройству. Авторы исследовали влияние количества отбойных лопастей, угла их поворота, а также ширины канала на распределение потоков. Отмечено, что увеличение количества лопастей приводит к увеличению равномерности распределения потока. Оптимальным углом



поворота лопасти признан 30° (представлены результаты моделирования при углах поворота 0°, 30°, 45°). Касаемо влияния ширины канала, чрезмерное снижение этой ширины приводит к увеличению скорости внутри канала, что может стать причиной снижения эффективности сепарации и неравномерного распределения потока в связи с высокой турбулентностью. Для примера, изложенного в статье [11], оптимальная ширина канала оказалась равна 16 %. Однако, вероятно, что этот показатель в первую очередь зависит от производительности колонны и физико-химических свойств сырья и может в каждом случае быть различным.

Представленные выше исследования по изучению устройств ввода сырья в массообменные (в основном, насадочные) аппараты проводились коллективами ученых и исследователей из различных научных институтов и университетов. Но стоит обратить внимание, что эта задача актуальна не только с научной точки зрения, но и с практической, поэтому коммерческие компании также проводят свои исследования подобных устройств. Например, можно обратить внимание на работы исследователей компании Sulzer [12], которые активно занимаются исследованиями узлов ввода. Ниже приведено исследование трех типов узлов ввода: без распределительных элементов, с отбойником (рисунок 1) и с распределительным устройством «vapor horn» (рисунок 8). Результаты CFD-анализа приведены на рисунке 9.



Рисунок 8 – Устройство ввода «vapor horn» Sulzer [12]

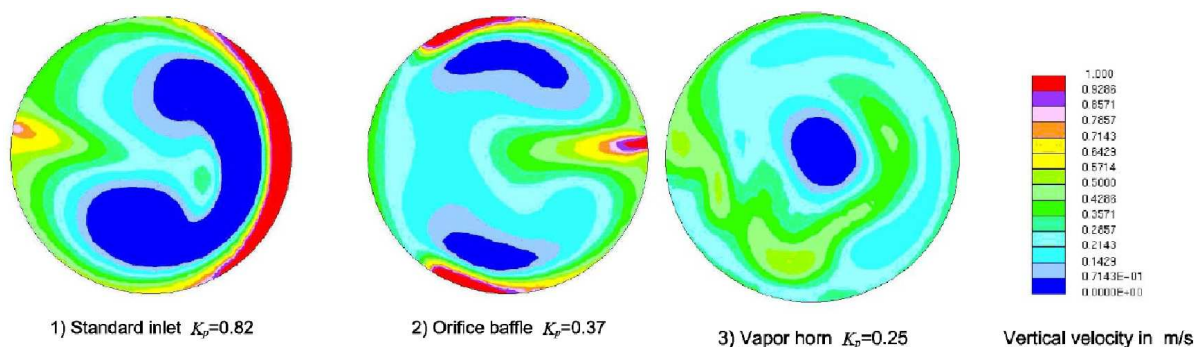


Рисунок 9 – Результаты моделирования устройств ввода Sulzer [12]

Как можно видеть, устройство ввода «vapor horn» обеспечивает намного более равномерное распределение пара, чем простые конструкции с или без отбойников.

В результате анализа можно сказать, что моделирование устройств ввода сырья в массообменные аппараты представляется важной, актуальной научной и практической задачей. Разнообразие этих устройств невелико, однако отсутствуют общепризнанные методики выбора и расчета отдельных конструктивных элементов узлов ввода. Большое количество научных организаций активно проводят исследования по моделированию устройств ввода сырья с применением CFD-анализа. Можно заметить, что подход к моделированию в целом похож: применяется пакет Fluent, модель турбулентности потока k-ε. Критерии сравнения также аналогичны – скорости потоков, коэффициент неравномерности распределения. Однако, следует отметить, что различные ученые берут разные скорости подачи сырья в колонну. Необходимо дополнительно изучить, как этот параметр влияет на распределение потоков. Кроме этого, стоит отметить, что нет опубликованной информации о перепаде давления в узлах ввода. Определение перепадов давления в узлах ввода – один из тех параметров, которые необходимо изучать в будущем. Перепад давления способен приводить к изменению степени испарения в зоне ввода, что может привести к изменению качества полученных продуктов массообменных аппаратов, особенно для вакуумных колонн.

Таким образом, при помощи CFD-моделирования можно определять для любой конструкции узла ввода коэффициент неравномерности распределения скоростей, температур, перепад давления.



Литература:

1. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа : учебник для вузов. – М. : Химия, 2001. – 568 с.
2. Маннанов Т.И. Исследование влияния эффективности сепарации в узле ввода сырья ректификационных колонн на энергетические затраты / Т.И. Маннанов, Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Булатовские чтения. – 2019. – Т. 4. – С. 85–88.
3. Исследовательский стенд для определения областей устойчивой работы контактных устройств фракционирующего оборудования / С.К. Чуракова [и др.] // Сб. мат. Всерос. науч.-практ. конф. «Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья». – Оренбург, 2019. – С. 172–175.
4. Насадки и внутренние устройства для тяжелых условий эксплуатации: рекламная брошюра компании Koch-Glitch. – 25 с.
5. Современные тарельчатые устройства: рекламная брошюра компании Sulzer. – 20 с.
6. Колонное оборудование: рекламная брошюра компании ИВЦ «Инжехим». – 17 с.
7. ЗАО ПИРО. Поставляемая продукция [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.zaopiro.ru/production.html>. – Заглавие с экрана. (Дата обращения 20.02.2020).
8. CFD-моделирование распределения газа в устройствах ввода насадочных колоннах / М. Хагшенасфард [и др.] // Хим. Инж. Технол., 2007. – № 9. – С. 1176–1180.
9. Женг С. Численное моделирование распределения потоков в укрепляющей нефтяной колонне / С. Женг, С. Жанг, З. Гао // АСМЕ Конференция «Сосуды под давлением и трубопроводы» (Сан-Антонио, Техас), 2007.
10. CFD-моделирование устройства ввода лопастного типа в колонне и анализ паров для двух различных входных потоков / Х. Бансал [и др.] // Эликсир Хим. Инж. – 2014. – № 66. – С. 20721–20725.
11. CFD-моделирование распределения газа и жидкости для двухпоточного тангенциального устройства ввода / Д. Лю [и др.] // Исследование и проектирование в химической инженерии. – 2007. – № 85. – С. 1375–1383.
12. Верли М. Влияние конструкции подачи пара на распределение потока под насадками / М. Верли, С. Хиршберг, Р. Швейцер // Хим. Инж. Технол. – 2003. – № 81. – С. 116–121.

References:

1. Manovyan A.K. Technology of primary processing of oil and natural gas. 2001. – 568 p.
2. Mannanov T.I., Lesnoy D.V., Churakova S.K. A study of the influence of the separation efficiency in the input node of the raw materials of the tower energy costs // Readings of A.I. Bulatov. – 2019. – Vol. 4. – P. 85–88.
3. Research stand for determining the areas of sustainable operation of fractionating equipment contact devices / S.K. Churakova [et al.] // in the collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference «New Directions for Oil and Gas Work, Innovative Technologies for the Development of Their Fields, Prospects for the Production of Unconventional Hydrocarbons». – Orenburg, 2019. – P. 172–175.
4. The Nozzle and inner structure for heavy conditions of operation: a brochure by Koch-Glitch. – 25 p.
5. Modern tray device: a brochure of the company Sulzer. – 20 p.
6. Column equipment: a brochure of the company IVC «Injekhim». – 17 p.
7. CJSC PIRO. Delivered products [Electronic resource]. – URL : <http://www.zaopiro.ru/production.html> – title from the screen. (Date of application 20.02.2020).
8. CFD Simulation of Gas Distribution Performance of Gas Inlet Systems in Packed Columns / M. Haghshenasfard [et al.] // Chem. Eng. Technol. – 2007. – № 9. – P. 1176–1180.
9. Zheng S. Numerical simulation of flow field in a quench oil tower / S. Zheng, S. Zhang, Z. Gao // ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (San Antonio, Texas), 2007.
10. CFD Simulation on Vane Type Feed Inlet Device in a Column- Vapour Flow Analysed for Two Different Feed Streams / H. Bansal [et al.] // Elixir Chem. Engg. – 2014. – № 66. – P. 20721–20725.
11. CFD simulation of gas-liquid performance in two direction vapour horn / D. Liu [et al.] // Chemical Engineering Research and Design. – 2007. – Vol. 85. – P. 1375–1383.
12. Wehrli M. Influence of vapour feed design on the flow distribution below packings / M. Wehrli, S. Hirschberg, R. Schweizer // I. Chem. Eng. – 2003. – № 81. – P. 116–121.