

Т. И. Маннанов (асп.), С. К. Чуракова (д.т.н., проф.)

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЛОПАСТНЫХ УСТРОЙСТВ ВВОДА МАССООБМЕННОГО И СЕПАРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра нефтехимии и химической технологии
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: t.i.mannanov@yandex.ru

T. I. Mannanov, S. K. Churakova

CALCULATED STUDY OF THE OPERATION OF BLADE DEVICES OF INPUT OF EQUIPMENT MASS-EXCHANGE AND OF SEPARATION EQUIPMENT

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: t.i.mannanov@yandex.ru

Представлен сравнительный анализ конструкций лопастных устройств ввода сырья в ректификационные аппараты методом CFD-моделирования. Проанализировано влияние таких конструктивных параметров, как ширина лопасти, расстояние между лопастями (количество лопастей) и угол поворота лопасти на высоту сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление. Показано, что лопастные устройства ввода сырья обеспечивают разделение парожидкостного потока при минимальной высоте сепарационной зоны при скорости подачи сырья 10 м/с и ниже, при более высоких скоростях высота сепарационной зоны зависит от конструкции устройства ввода. Прослежена зависимость высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления от скорости подачи сырья в диапазоне 5–15 м/с.

Ключевые слова: высота сепарационной зоны; гидравлическое сопротивление; лопастное устройство ввода; массообменная колонна; моделирование гидродинамики; паро-жидкостной поток; ректификация; скорость подачи сырья; сепарация; устройство ввода сырья.

Устройства ввода сырья в такое массообменное оборудование, как сепараторы, ректификационные и абсорбционные колонны, выполняют задачу разделения сырьевого потока на паровую и жидкую фазы¹. Во время проведения технологических расчетов ректификационных колонн принимается, что в зоне подачи сырья происходит полное однократное испарение (конденсация) поступающего потока. При

The article presents a comparative analysis of the designs of vane devices for entering raw materials into rectification devices by CFD modeling. The influence of such design parameters as the width of the vane, the distance between the vanes (number of blades) and the angle of rotation of the vane on the height of the separation zone and pressure drop is analyzed. It is shown that the vane input devices of raw materials provide separation of the vapor-liquid flow at a minimum height of the separation zone at a feed rate of 10 m/s and below, at higher speeds, the height of the separation zone depends on the design of the input device. The dependences of the height of the separation zone and pressure drop on the feed rate of raw materials in the range of 5–15 m/s are shown.

Key words: feed rate; hydrodynamic modeling; input device of raw materials; mass transfer column; pressure drop; rectification; separation; separation zone height; vane input device; vapour-liquid flow.

работе в моделирующих программах расчет осуществляется по правилу смешения: паровой поток с отгонной секции полностью смешивается с паровой частью поступающего сырья, а жидкость с укрепляющей секции полностью смешивается с жидкой частью сырья. Однако, в реальности зачастую разделение происходит не полностью, при высоких скоростях потока жидкость может разбрызгиваться, в результате чего мелкие капельки жидкости уносятся вместе с потоком газа.

Дата поступления 23.09.21

В статье ² было проведено математическое моделирование процесса ректификации модельного углеводородного сырья, 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%. В статье ³ приводятся результаты реконструкции промышленной колонны вакуумной перегонки мазута. Показано, что изменение ориентации штуцеров ввода и применение каплеотбойного устройства в узле ввода, а также дополнительное увеличение диаметра трансферного трубопровода для снижения скорости подачи сырья, позволило снизить образование тумана и улучшить условия сепарации фаз в зоне питания. В результате был увеличен отбор масляной фракции в 1.3 раза, что составило 80% от потенциала, содержание легких углеводородов в гудроне снижено с 25% до 7%. Эти результаты доказывают значительное влияние процессов, происходящих в узле ввода сырья, на общий результат работы ректификационной колонны. Таким образом, исследование работы устройств ввода сырья в массообменные колонны является важной и актуальной проблемой.

Наиболее известными поставщиками устройств ввода являются: *Koch-Glitch* (тангенциальное устройство ввода *Vapor Horn*, лопастное устройство *Evenflow*) ⁴, *Sulzer* (лопастное устройство *Schoepentoeter*) ⁵, Инжехим (устройства ввода с гофрированными листами) ^{6,7}, ПИРО (лопастное устройство ввода) ⁸ и др. Кроме представленных в каталогах конструкций существуют узлы ввода сырья без каких-либо конструктивных элементов, а также с отбойниками ⁹.

Анализ литературных источников был проведен нами ранее ¹⁰. В результате анализа были сделаны выводы, что моделирование устройств ввода сырья в массообменные аппараты представляется важной, актуальной научной и практической задачей. 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, с применением пакетов *ANSYS CFX* и *Fluent*, модель турбулентности потока $k-\epsilon$ ¹⁰. Критериями сравнения являются скорости потоков, степень разделения парожидкостной смеси, коэффициент неравномерности распределения. Однако следует отметить, что разные исследователи принимают

разные скорости подачи сырья в колонну, и полноценные исследования зависимости скорости на показатели работы устройств ввода отсутствуют. Кроме того, нет опубликованной информации о перепаде давления в узлах ввода, который может привести к изменению степени испарения в зоне ввода, что повлечет за собой изменение качества полученных продуктов массообменных аппаратов, особенно вакуумных колонн ¹⁰.

Одним из наиболее распространенных устройств ввода сырья является лопастной распределитель. Производители ^{4,5,8} утверждают, что лопастные устройства обеспечивают хорошее разделение парожидкостных потоков. Лопастные устройства ввода разных производителей отличаются между собой такими параметрами, как угол поворота лопастей, расстояние между лопастями, длина лопастей, конструкция лопастей (например, лопасть может быть гнутой) и т.д. Однако нет каких-либо общепризнанных данных о влиянии этих параметров на сепарацию и распределение сырьевого потока.

Исходные данные и метод моделирования

В данной работе проведено исследование влияния конструктивных параметров лопастного устройства ввода сырья на процесс разделения парожидкостного потока. 3D-модель устройства ввода представлена на рис. 1. Расчеты проводились при помощи программного пакета *ANSYS CFX* согласно модели турбулентности потока $k-\epsilon$.

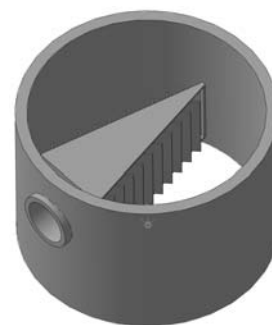


Рис. 1. 3D-модель лопастного устройства ввода сырья

Для оценки работоспособности устройства ввода сырья оценивались следующие показатели:

- высота сепарационной зоны (h_1), т.е. высота от оси штуцера ввода сырья до сечения, в котором наблюдается отсутствие (менее 1% об.) жидкой фазы (отметим, что расстояние от верхней кромки лопастного устройства ввода до оси штуцера составляет 400 мм, следова-

тельно, это минимальное значение высоты сепарационной зоны);

— перепад давления (гидравлическое сопротивление, Δp) устройства ввода сырья.

Результаты расчетов и их обсуждение

На первом этапе исследовалась зависимость вышеуказанных показателей от скорости подаваемого потока. Сырьем является углеводородный поток, принятый при исследовании влияния степени разделения сырья в узле ввода, которое было описано в работе ², соответственно, физические свойства потоков соответствуют промышленным колоннам. Доля пара в данном сырье — 0.72 об. Состав сырья приведен в табл. 1. Моделируемое лопастное устройство ввода сырья имеет по 10 лопастей с каждой стороны (расстояние между лопастями принято равным 126 мм). Ширина лопасти 150 мм, угол поворота лопасти относительно перпендикуляра к плоскости выхода потока из устройства принят равным 30° . Диаметр корпуса колонны 2 м. В результате моделирования гидродинамики потока в лопастном устройстве ввода сырья получены результаты, приведенные в табл. 2.

Таблица 1

**Состав сырья,
подаваемого в устройство ввода**

Компонент	Состав, % мол.		
	Сырье	Паровая часть	Жидкостная часть
Метан	24.70	31.84	0.00
Этан	26.18	33.75	0.00
Пропан	25.60	32.41	2.00
Изобутан	12.03	1.79	47.47
Бутан	11.49	0.21	50.53

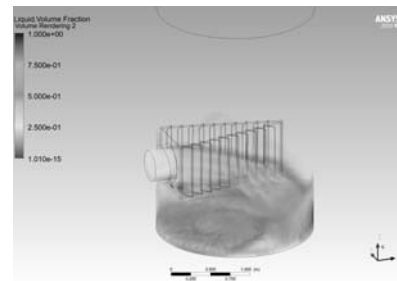
Таблица 2

**Результаты моделирования гидродинамики
лопастного устройства ввода**

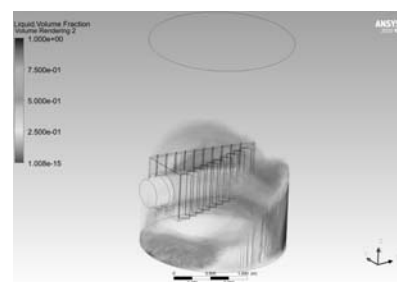
Скорость входящего потока, м/с	Высота сепарационной зоны h_1 , мм	Перепад давления Δp , мм рт. ст.
5	400	23.06
7.5	400	48.75
10	400	69.12
12.5	500	113.44
15	700	158.13

Как видно из результатов расчетов, увеличение скорости подачи парожидкостного сырья приводит к увеличению высоты сепарационной зоны и к уменьшению высоты зоны распределения. Отметим, что моделируемое лопастное устройство ввода сырья обеспечивает полное отделение жидкой фазы от паровой при скорости подачи сырья 10 м/с и меньше.

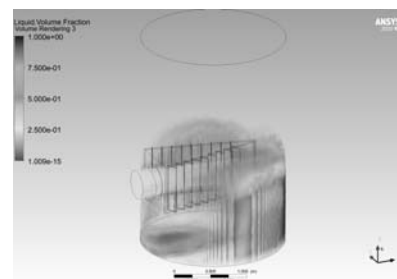
При увеличении скорости подачи сырья происходит ударение потока сырья об стенки колонны и разбрызгивание капель жидкости, что обуславливает увеличение сепарационной зоны. Визуализация распределения потока жидкости при различных скоростях подачи сырья приведена на рис. 2.



а



б



в

Рис. 2. Распределение потока жидкости в устройстве ввода сырья при скорости подачи сырья:
а — 5 м/с; б — 10 м/с; в — 15 м/с

Перепад давления в устройстве ввода возрастает при увеличении скорости подачи сырья, зависимость имеет характер, соответствующий уравнению Дарси-Вейсбаха.

На втором этапе расчетного исследования лопастного устройства ввода сырья исследовалось влияние на показатели разделения и распределения потока следующих конструктивных параметров:

- ширина лопасти;
- расстояние между лопастями;
- угол поворота лопасти относительно перпендикуляра к плоскости выхода потока из устройства (рис. 3).

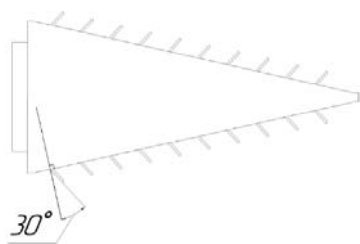


Рис. 3. К определению угла поворота лопасти (на рисунке 30°)

Для каждого случая проводился расчет в диапазоне скоростей подачи сырья от 5 до 15 м/с. Результаты расчетов исследования влияния ширины лопасти на работу устройства ввода сырья приведены на рис. 4, 5.

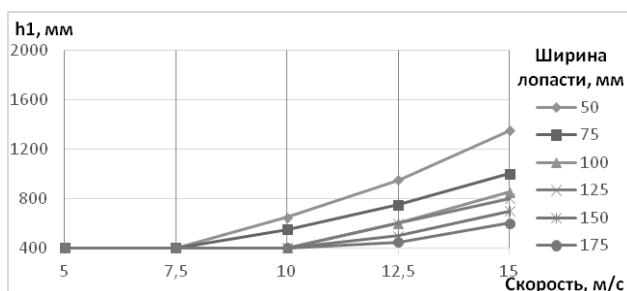


Рис. 4. Зависимость высоты сепарационной зоны от скорости потока и ширины лопасти

Из рис. 4 видно, что увеличение ширины лопастей ведет к уменьшению высоты сепарационной зоны, причем это влияние особенно заметно при высоких скоростях сырьевого потока, а также к уменьшению высоты зоны распределения парового потока, при скоростях подачи сырья выше 7.5 м/с. Наибольшая высота сепарационной зоны наблюдается при ширине лопастей 50 мм и скорости подачи сырья 15 м/с — 1350 мм. При ширине лопасти 175 мм эта высота составляет 600 мм, что меньше в 2.25 раза.

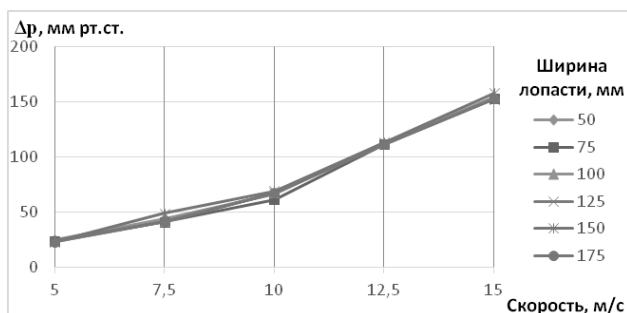


Рис. 5. Зависимость перепада давления в узле ввода от скорости потока и ширины лопасти

Как видно из рис. 5, гидравлическое сопротивление практически не изменяется при изменении ширины лопасти и зависит в большей степени от скорости подаваемого потока

сырья. Результаты расчетов исследования влияния количества лопастей на работу устройства ввода сырья приведены на рис. 6, 7.

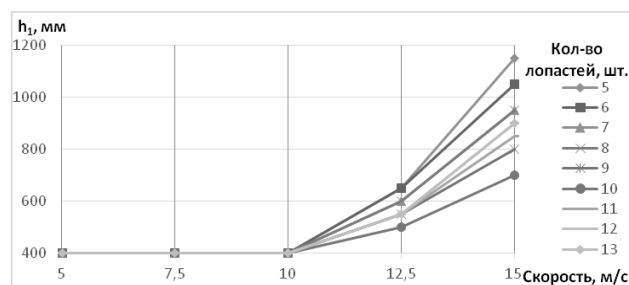


Рис. 6. Зависимость высоты сепарационной зоны от скорости потока и расстояния между лопастями

Как видно из рис. 8, наименьшая высота сепарационной зоны наблюдается при количестве лопастей, равном 10. Увеличение или уменьшение количества лопастей от данного значения приводит к ухудшению сепарации и увеличению требуемой высоты сепарационной зоны. При увеличении либо уменьшении расстояния между лопастями высота сепарационной зоны увеличивается, максимально до 1150 мм при количестве лопастей 5 шт.

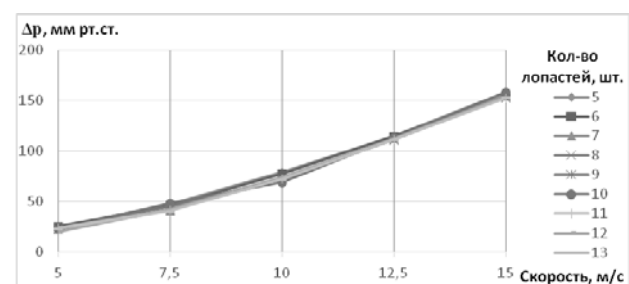


Рис. 7. Зависимость перепада давления в узле ввода от скорости потока и расстояния между лопастями

Как видно из рис. 7, гидравлическое сопротивление практически не зависит от количества лопастей и расстоянием между ними.

Результаты расчетов исследования влияния угла поворота лопастей на работу устройства ввода сырья приведены на рис. 8–10.

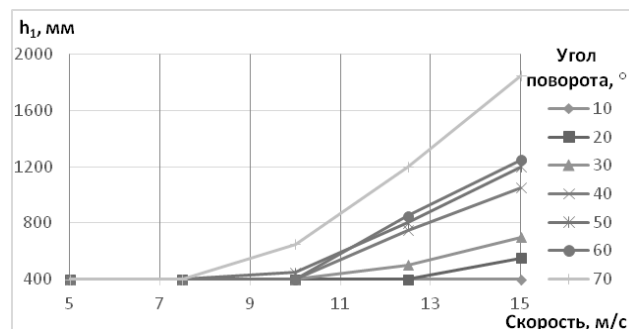


Рис. 8. Зависимость высоты сепарационной зоны от скорости потока и угла поворота лопастей

Из рис. 8 видно, что увеличение угла поворота лопастей приводит к увеличению высоты сепарационной зоны в целом, при любых значениях скорости потока, значительному увеличению высоты зоны распределения парового потока, также при любых значениях скорости потока, и практически не влияет на гидравлическое сопротивление. При угле поворота 10° высота сепарационной зоны составляет 400 мм при скорости 15 м/с, что позволяет рекомендовать устройство ввода именно такой конструкции для работы с сырьем при высокой скорости подачи (рис. 9). При угле поворота 70° высота сепарационной зоны составляет 1850 мм, что больше минимальной величины в 4.63 раз.

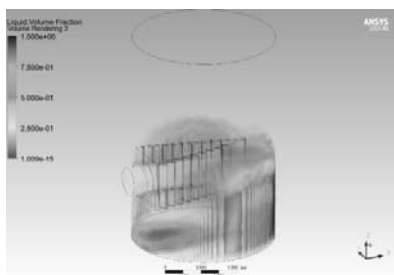


Рис. 9. Распределение потока жидкости по устройству ввода сырья при угле поворота лопасти 10° и скорости подачи сырья 15 м/с

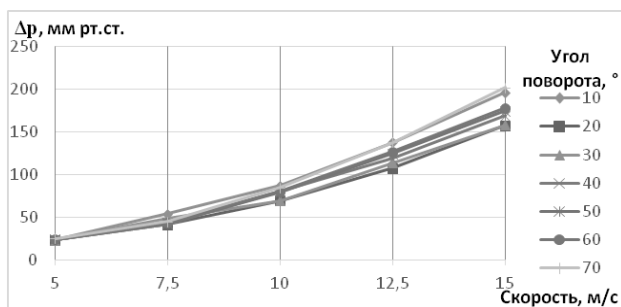


Рис. 10. Зависимость перепада давления в узле ввода от скорости потока и угла поворота лопастей

Из рис. 10 видно, что наибольшее гидравлическое сопротивление наблюдается для устройств ввода с углом поворота лопасти 10° и 70° . Первое связано с тем, что поток сырья совершает поворот практически под прямым углом, ударяясь при этом об стенку лопасти, а второе связано с слишком малым углом отклонения и возникающим смешиванием выходящих из устройства ввода потоков. Минимальное гидравлическое сопротивление наблюдается при угле поворота лопасти 20° , при дальнейшем увели-

чении этого показателя до 70° гидравлическое сопротивление при скорости 15 м/с увеличивается от 157.5 до 202.0 мм рт. ст., т.е. 28.25%. Высокое гидравлическое сопротивление при больших углах поворота лопастей объясняется перемешиванием разделенных потоков после прохождения лопастей. Гидравлическое сопротивление при угле поворота лопасти 10° и скорости подачи 15 м/с составляет 196.4 мм рт. ст. Вероятно, это связано с высоким углом поворота жидкости и ударением потока жидкости об стенки колонны, т.к. путь жидкости до стенки колонны при таких условиях наименьший.

Таким образом, в результате сравнительного анализа устройств ввода сырья, проведенного методом математического моделирования в среде *ANSYS CFX*, показано:

- применение лопастных устройств ввода сырья позволяет обеспечить сепарацию парожидкостного сырьевого потока непосредственно в устройстве ввода при скорости подачи сырья до 10 м/с;

- при увеличении скорости подачи сырья увеличивается требуемая высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление;

- при изменении ширины лопасти в рассматриваемой конструкции от 50 до 175 мм высота сепарационной зоны уменьшается с 1350 до 600 мм при скорости 15 м/с, т.е. в 2.25 раза, что показывает целесообразность применения лопастей большой ширины;

- зависимость высоты сепарационной зоны от количества лопастей имеет минимум, наименьшую высоту сепарационной зоны при скорости подачи сырья 15 м/с имеет устройство ввода с количеством лопастей 10 шт. — 700 мм. При увеличении либо уменьшении расстояния между лопастями высота сепарационной зоны увеличивается до 1150 мм (максимально) при количестве лопастей 5 шт. Гидравлическое сопротивление устройств ввода при изменении расстояния между лопастями изменяется незначительно.

- значительное влияние на высоту сепарационной зоны имеет угол поворота лопасти: при изменении угла поворота от 10° до 70° высота сепарационной зоны увеличивается в 4.63 раза. Гидравлическое сопротивление минимально при угле поворота 20° , при увеличении этого показателя до 70° оно возрастает на 28.25%. При угле поворота 10° гидравлическое сопротивление также велико.

Литература

1. Петрашова Е.Н., Лагуткин М.Г., Пушнов А.С., Шишов В.И. Разработка и испытания нового каплеулавливающего устройства // Химическое и нефтегазовое машиностроение.— 2011.— №4.— С.22-25.
2. Маннанов Т.И., Лесной Д.В., Чуракова С.К. Исследование влияния эффективности сепарации в узле ввода сырья ректификационных колонн на энергетические затраты / Булатовские чтения.— 2019.— Т.4.— С.85-88.
3. Чуракова С.К., Богатых К.Ф., Сидоров Г.М., Резяпов Р.Н. Внедрение перекрестноточных каплеуловителей с целью интенсификации работы массообменных аппаратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение.— 2013.— №6.— С.7-19.
4. Cusack R. Rethink your liquid-liquid separations // *Hydrocarbon Processing*, 2009.— Pp.53-60.
5. Wehrli M., Hirschberg S., Schweizer R. Influence of vapour feed design on the flow distribution below packings // *I. Chem. Eng.*— 2003.— №81.— Pp.116-121.
6. Колонное оборудование: рекламная брошюра компании ИВЦ «Инжехим».— 17 с. <https://ingehim.ru/files/kolonnoe-oborudovanie.pdf>
7. Патент №2329849 РФ. Газораспределительное устройство для массообменных аппаратов / Фарахов М.И., Салимгареев И.Б., Шигапов И.М., Ахлямов М.Н., Хасанов Р.М., Асибаков Л.И. // Б.И.— 2008.— №21.
8. Патент на полезную модель №10599 РФ. Узел ввода сырья тепломассообменного аппарата / Пильч Л.М., Сидоров И.Б., Семенистый М.Ю., Илларионов А.Ю., Веснин Р.В., Колмогоров Г.Ю., Галихин А.П., Каштанов А.П., Максимов С.В. // Оpubл. 1999.
9. Haghshenasfard M., Zivdar M., Rahimi R., Nasr Esfahany M. CFD Simulation of Gas Distribution Performance of Gas Inlet Systems in Packed Columns // *Chem. Eng. Technol.*, 2007.— №9.— Pp.1176-1180.
10. Маннанов Т.И., Чуракова С.К., Лесной Д.В., Константинов Е.К., Муллабаев К.А. CFD-анализ — современный подход к исследованию процесса разделения и распределения потоков в устройствах ввода сырья массообменных аппаратов // Булатовские чтения.— 2020.— Т.5.— С.159-165.

References

1. Petrashova E.N., Lagutkin M.G., Pushnov A.S., Shishov V.I. *Razrabotka i ispytaniya novogo kapleulavliyayushhego ustroystva* [Development and testing of a new droplet collecting device]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2011, no.4, pp.22-25.
2. Mannanov T.I., Lesnoy D.V., Churakova S.K. *Issledovanie vliyaniya effektivnosti separatsii v uzle vvoda syr'ya rektifikatsionnykh kolonn na energeticheskie zatraty* [Investigation of the effect of separation efficiency in the input unit of rectification columns on energy costs]. *Bulatovskie chteniya* [Readings of A.I. Bulatov], 2019, vol.4, pp.85-88.
3. Churakova S.K., Bogatykh K.F., Sidorov G.M., Rezyapov R.N. *Vnedreniye perekrystnotochnykh kapleuloviteley s tsel'yu intensivatsii raboty massoobmennyykh apparatov* [Introduction of cross-flow droplet traps in order to intensify the work of mass transfer devices]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2013, no.6, pp.7-19.
4. Cusack R. [Rethink your liquid-liquid separations]. *Hydrocarbon Processing*, 2009, pp.53-60.
5. Wehrli M., Hirschberg S., Schweizer R. [Influence of vapour feed design on the flow distribution below packings]. *I. Chem. Eng.*, 2003, no.81, pp.116-121.
6. *Kolonnoye oborudovaniye: reklamnaya broshyura kompanii IVC «Inzhekhim»* [Column equipment: advertising brochure of the EPC «Ingekhim» company], 17 p. <https://ingehim.ru/files/kolonnoe-oborudovanie.pdf>
7. Farakhov M.I., Salimgareev I.B., Shigapov I.M., Akhlyamov M.N., Khasanov R.M., Asibakov L.I. *Gasoraspredelitel'noye ustroystvo dlya massoobmennyykh apparatov* [Gas distribution device for mass transfer devices]. Patent RF no.2329849, 2008.
8. Pil'ch L.M., Sidorov I.B., Semenisty M.Yu., Illarionov A.Yu., Vesnin R.V., Kolmogorov G.Yu., Galikhin A.P., Kashtanov A.P., Maksimov S.V. *Uzel vvoda syr'ya teplomassooobmennogo apparata* [The input node of the raw materials of the heat and mass transfer equipment]. Patent RF no.10599, 1999.
9. Haghshenasfard M., Zivdar M., Rahimi R., Nasr Esfahany M. [CFD Simulation of Gas Distribution Performance of Gas Inlet Systems in Packed Columns]. *Chem. Eng. Technol.*, 2007, no.9, pp.1176-1180.
10. Mannanov T.I., Churakova S.K., Lesnoy D.V., Konstantinov E.K., Mullabaev K.A. *CFD-analiz — sovremennyy podkhod k issledovaniyu protsessa razdeleniya i raspredeleniya potokov v ustroystvakh vvoda syr'ya massoobmennyykh apparatov* [CFD-analysis — a modern approach to the study of the process of separation and distribution of flows in the input devices of raw materials of mass transfer devices]. *Bulatovskie chteniya* [Readings of A.I. Bulatov], 2020, vol.5, pp.159-165.