УДК 66.061.3
DOI: 10.17277/vestnik.2018.04.pp.642-651

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОТОРНО-ДИСКОВЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЭКСТРАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

А. А. Щепалов[1], Д. Е. Суханов[2], А. В. Степыкин[2], А. С. Новоселов[3], Е. С. Котлова[3]

АО «Управляющая компания «Биохимического холдинга «Оргхим» (1), г. Нижний Новгород, Россия;
кафедра «Технология и оборудование химических и пищевых производств» (2), Дзержинский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», г. Дзержинск, Россия; Stepykin.dpi-ngtu@yandex.ru;
НИИ Химии (3), ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, Россия

Ключевые слова: гидродинамика; массообмен; массоотдача; нефтепереработка; нефтехимия; твердофазная экстракция; экстракция.

Аннотация: Рассмотрен вопрос перспективности применения роторно-дисковых аппаратов в условиях твердофазной экстракции. Основным рассматриваемым технологическим процессом является технология АЛЬБУС-1, направленная на переработку отходов нефтяной промышленности в светлые масла-наполнители для пластических полимерных материалов и ароматические – для каучуков. Одной из стадий разработанной технологии является экстракционная очистка сырья комплексом на основе хлористого алюминия, направленная на получение светлых масел-наполнителей. Обоснован выбор роторно-дискового экстрактора для рассматриваемого процесса разделения, с учетом особенностей исследуемой среды. Приведены эмпирические и численные подходы к расчету и моделированию аппарата, применяемые в настоящее время. Поставлена задача на исследование – определение применимости расчетных методик, выбор наиболее адекватной модели процесса при дальнейшем исследовании. Дано описание лабораторных экстракторов, разработанных на основе предварительных расчетов.

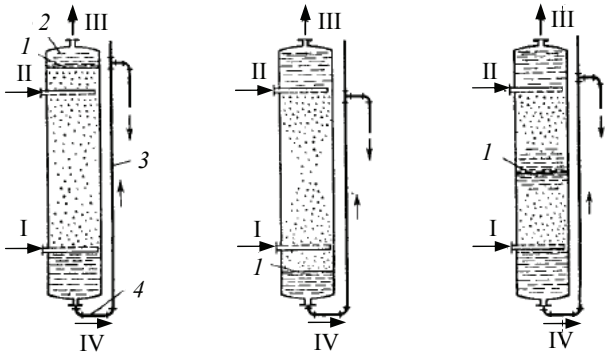
Развитие нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей промышленности РФ является одним из приоритетных направлений отечественной науки. При этом наиболее экономически эффективным вариантом развития является рациональное использование побочных продуктов и отходов. В связи с этим разработка инновационных методов переработки побочных продуктов нефтехимических производств является актуальной задачей современной нефтепереработки и нефтехимии.

В ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» разработана технология АЛЬБУС-1, направленная на переработку отходов нефтяной промышленности в светлые масла-наполнители для пластических полимерных материалов и ароматические масла-наполнители для каучуков. В технологии использованы хорошо известные процессы жидкостной экстракции с привлечением уникальных технологических решений.

В частности, одной из стадий разработанной технологии является экстракционная очистка сырья комплексом на основе хлористого алюминия, направленная на получение светлых масел-наполнителей. Поскольку экстрагент в рассматриваемом процессе содержит твердую фазу, то это значительно осложняет расчет технологических аппаратов для подобных процессов и приводит к необходимости их моделирования.

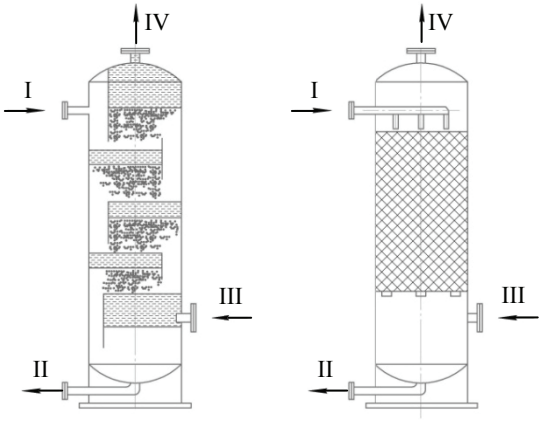
Цель работы – предварительный расчет и моделирование аппарата для проведения жидкостной экстракции в присутствии твердой фазы и дальнейшего создания оборудования для опытно-промышленной установки АЛЬБУС-1, на которой реализуется разрабатываемая технология.

Для экстракционной очистки применяются различные виды оборудования. Самыми простыми являются распылительные экстракторы [1], приведенные на рис. 1. Данные экстракторы просты в конструкции, но из-за малой турбулизации жидкостных потоков не дают достаточно качественного перемешивания фаз в аппарате. В связи с этим перспективным видом оборудования являются аппараты с внутренними устройствами. К таким относятся тарельчатые [1] и насадочные аппараты (рис. 2).



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Распылительный экстрактор с разным уровнем границы раздела фаз:
а, *б* – границы в верхней и нижней частях соответственно; *в* – граница в объеме аппарата;
1 – уровень раздела фаз; *2* – слой легкой фазы; *3* – гидравлический затвор;
4 – место установки регулирующего вентиля; I, III – легкая фаза; II, IV – тяжелая фаза



а) *б*)

Рис. 2. Тарельчатый (*а*) и насадочный (*б*) экстракторы:
III, IV – легкая фаза; I, II – тяжелая фаза

Аппараты с перфорированными тарелками и слоем насадки достаточно эффективны в процессах жидкостной экстракции, однако, в условиях наличия твердой фазы с сильно загрязненными компонентами возможно нарушение пропускной способности контактных элементов из-за возможности появления отложений.

Наиболее приемлемым является оборудование с внутренними движущимися частями, в частности, пульсационные аппараты [2] с механическими и пневматическими пульсаторами, а также экстракторы роторно-дискового типа. Конструкции и схемы управления пульсационных аппаратов довольно сложны, а применение в условиях жидкостей с высокой вязкостью может быть экономически нецелесообразно.

Роторно-дисковые аппараты, напротив, достаточно просты по конструкции и в управлении (несмотря на наличие внутренних подшипников и уплотнительных узлов), а их элементы (ввиду движения) не склонны накапливать отложения. Малые затраты энергии являются также одним из преимуществ такого типа экстракторов. Важной особенностью работы является возможность изменения частоты вращения дисков, что позволяет корректировать время пребывания частиц твердой фазы, и, как следствие, оказывать влияние на качество процесса, что является важным, в условиях непрерывно изменяющихся характеристик потока. Схема данного аппарата [3] приведена на рис. 3.

Аппарат работает следующим образом: легкая фракция, поднимаясь в верхнюю часть, контактирует с распределенной тяжелой фракцией (или наоборот – тяжелая фракция двигается сверху вниз в распределенной легкой). Тарелки *3* заставляют фракционные потоки двигаться по сложной траектории. За счет вращения дисков, жидкость отбрасывается к краям аппарата и начинает циркулировать в пристеночных зонах между кольцевыми тарелками *2*. В связи с этим наиболее перспективным типом экстрактора для рассматриваемого процесса считается роторно-дисковый аппарат.

Использование известных моделей определения эффективности работы экстракционных аппаратов, а также расчет по эмпирическим зависимостям, моделирование в прикладных программных пакетах не гарантирует получения достоверных результатов при проектировании новой технологии, что часто приводит к несоответствию получаемых заказчиком составов рафината и экстракта по отношению к расчетным.

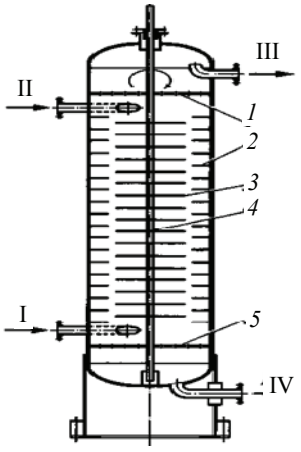


Рис. 3. Роторно-дисковый экстрактор: *1*, *5* – распределительные решетки, *2*, *3* – тарелки с кольцевым вырезом и вращающаяся соответственно; *4* – вал; I, III – легкая и II, IV – тяжелая фазы

В связи этим практическое применение данного вида оборудования должно быть сопряжено с его пилотными испытаниями, совместно с предварительным моделированием. Это позволит выявить режимы и определить основные расходные характеристики экстрактора.

Расчет аппарата состоит из двух этапов: равновесный расчет процесса, в результате которого определяют балансовые соотношения, требуемое время пребывания потоков в аппарате и расчет массопередачи, учитывающий особенности конструкции аппарата, в котором протекает рассматриваемый процесс.

Первый этап расчета предполагает всестороннее изучение процесса на уровне его химизма. Однако в условиях реального производства ключевым фактором при экстракции могут стать исключительно физические условия протекания процесса в аппарате.

Вертикальный колонный экстрактор с роторно-дисковыми перегородками имеет сложную структуру внутренних потоков. При экстрагировании в присутствии дополнительной твердой фазы описание гидродинамики движения фаз значительно усложняется (два жидких потока, дополнительная твердая фаза). Для определения скорости частиц в жидкости используют зависимости для определения скорости осаждения частиц в неподвижной жидкости. Однако с учетом противоточного обтекания другой жидкостью, в уравнения движения вводят поправку. Критерий Рейнольдса, выраженный через критерий Архимеда Ar, определяющий скорость осаждения (как следствие, время пребывания), определяют [4]

$$\mathrm{Re_C} = \frac{\mathrm{Ar}}{18 + 0{,}61\mathrm{Ar}^{0{,}5}}\,. \tag{1}$$

Скорость, с учетом обтекания, определяют с учетом поправок

$$V_\infty = \frac{\mathrm{Re_C}\, \nu_\mathrm{C}}{d}\varphi'\varphi'', \tag{2}$$

где φ' – коэффициент формы частицы; φ'' – коэффициент, учитывающий стесненность движения; d – диметр частицы.

Более сложный вариант зависимости, учитывающий закон сохранения импульса, приведен в [5]:

$$\frac{\pi}{6}\left(d^3\rho_D\frac{du_1}{dt}\right) = \frac{\pi}{8}d^2\rho_2\xi|u_2 - u_1|(u_2 - u_1) + \frac{\pi}{6}\left(d^3\rho_\mathrm{c}\frac{du_2}{dt}\right) +$$

$$+\frac{\pi}{12}\left(d^3\rho_\mathrm{c}\frac{du_2}{dt} - \frac{du_1}{dt}\right) + \frac{3}{2}d^2\sqrt{\pi\nu_2}\int\left(\frac{\frac{du_2}{dt'} - \frac{du_1}{dt'}}{\sqrt{t - t'}}\right)dt' + F_\mathrm{п}. \tag{3}$$

В случае наличия смесительных устройств расчет ведут по зависимости из [6]

$$u_\mathrm{обт} = \sqrt{\frac{\pi\Delta\rho u_\mathrm{м}^2 d_\mathrm{э}}{6\xi\rho d_\mathrm{м}}}\,, \tag{4}$$

где $\Delta\rho$ – разница плотностей частиц и несущей фазы; $u_\mathrm{м}$ – скорость конца лопасти перемешивающего устройства; ξ – коэффициент сопротивления.

Однако точных решений, позволяющих рассчитать гидродинамику движения частиц в сложном двухкомпонентном потоке жидкостей (при противотоке), не найдено [4, 7].

Рассматривая вышеуказанные методики расчета, можно сделать вывод о существенных трудностях их применения в условиях встречного движения двух жидкостей, когда одна из них обогащена твердой фазой. Два потока, смешиваясь, создают поверхности контакта случайной формы. Кроме этого твердые частицы подвергаются встречному обтеканию. Все это приводит к неопределенности при описании гидродинамики движения фаз в системе. В связи с этим примем ряд допущений, позволяющих провести расчет.

Технологически процесс предполагает взаимодействие двух жидкостей, двигающихся со скоростями около 0,0005 м/с. В связи с этим скорость среды можно принять равной нулю, так как скорость осаждения частиц твердой фазы на порядок выше. Скорость осаждения частиц предлагается определять по формуле [8], применяемой ранее только при расчете аппаратов для отстаивания:

$$\mathrm{Re} = \frac{\sqrt{367 + k_\text{ф}\mathrm{Ar}\varepsilon^{4{,}75}} - \sqrt{367}}{0{,}588k_\text{ф}}, \tag{5}$$

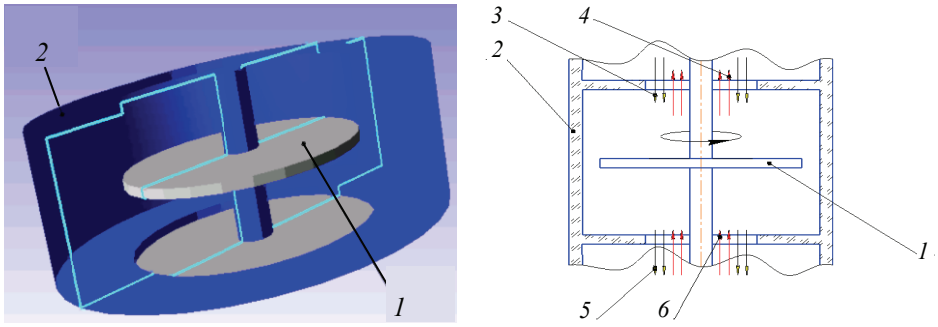
где $k_\text{ф}$ – коэффициент формы.

Таким образом, зависимость (5) позволяет выполнить оценку минимального времени пребывания частиц в аппарате, то есть в условиях неподвижных дисков. Диски выполняют роль турбулизаторов потока и позволяют увеличивать время контакта фаз, повышать скорость конвективного массопереноса. Однако достаточно высокая скорость может привести к формированию застойных зон в ячейках и далее к снижению общей эффективности. В связи с этим важной задачей является исследование возможности применения данной аппаратуры в условиях сложного многофазного гетерогенного процесса экстракции.

Для оценки диапазона работы экстракционных аппаратов проведен предварительный расчет согласно методам, предложенным в [6, 8], лабораторного экстрактора, использованного при разработке технологии АЛЬБУС-1 по ранее предложенной методике, на основе чего спроектированы ячейки лабораторного экстрактора в трехмерной графике, внутренним диаметром 45 и 100 мм. Пример модели ячейки 45 мм приведен на рис. 4. Согласно схеме, в аппарате контактируют две фазы – тяжелая и легкая. В качестве допущения при моделировании принимается, что в аппарате единовременно присутствует только одна фаза, которая движется сверху вниз, она же и является целевой – несущей твердую фазу.

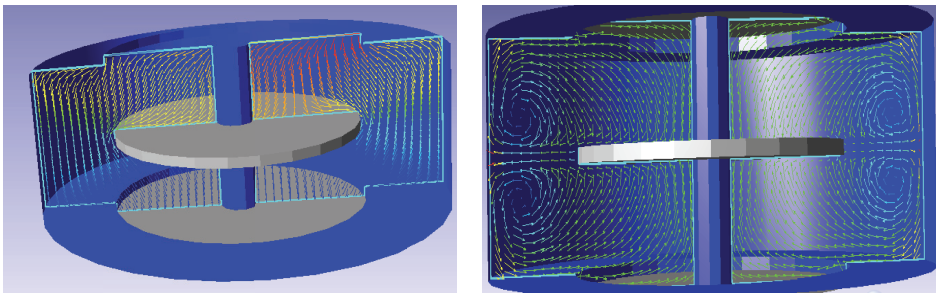
Для оценки работоспособности аппарата с таким типом ячейки модель была загружена в препроцессор CAE/CFD программы Flow Vision 3.10 (ИК ТЕСИС). В результате получены различные варианты распределения одномерного потока жидкости, в зависимости от геометрических соотношений элементов экстрактора, частоты вращения диска и параметров входного потока.

Принципиально полученные распределения линий тока можно разделить на три группы. Первый тип распределения (рис. 5, *а*) предполагает малое влияние вращающегося диска на поток и, как следствие, линии тока мало отклоняются от первоначального направления и лишь огибают элементы ячейки. Данный режим соответствует малой интенсивности перемешивания, а результаты расчета по времени пребывания частиц будут согласовываться с результатами расчета по (5). Напротив, ряд режимов (рис. 5, *б*) характеризуется высокой степенью турбулизации потока, что визуально проиллюстрировано множеством запутанных линий тока, наличием застойных зон циркуляции. Такой вариант работы аппарата может приводить к значительному увеличению времени пребывания частиц и неэффективности использования рабочего объема.



а) *б*)

Рис. 4. Модель экстракционной ячейки и схема ее работы:
а – твердотельная 3D-модель в разрезе с внутренним диаметром 45 мм;
б – схема потоков в ячейке экстрактора:
1 – вращающийся диск; *2* – корпус аппарата; *3*, *5* – вход и выход тяжелой фракции, содержащей твердые частицы, соответственно; *4*, *6* – вход и выход легкой фракции из аппарата соответственно



а) *б*)

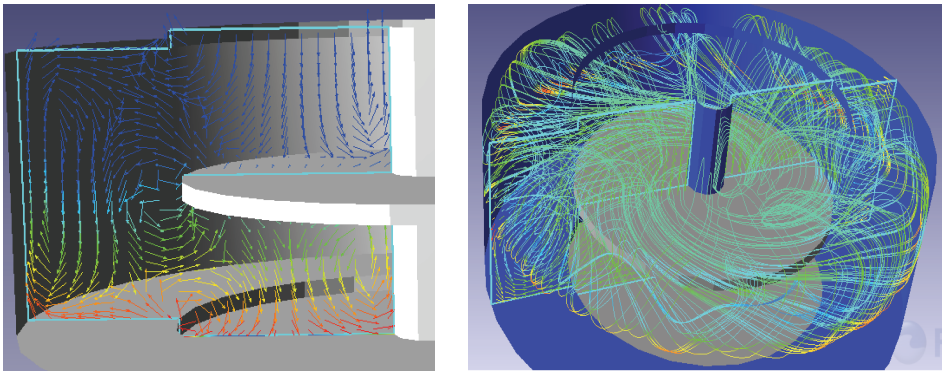
Рис. 5. Результаты моделирования ячейки экстрактора с распределением векторов скорости при малом влиянии скорости диска на поток (*а*) и возникновении застойных зон (*б*)

Промежуточный вариант работы аппарата соответствует частоте вращения диска около 50…200 об/мин. Расстояние между неподвижными тарелками составляет половину диаметра ячейки экстрактора. В данном варианте работы присутствуют «разомкнутые» циркуляционные контуры движения вещества (рис. 6, *а*), что представляет особый интерес. Кроме этого, сохраняется турбулизация потока, что проиллюстрировано с помощью соответствующих линий тока в ячейке (рис. 6, *б*).

Таким образом, до проведения экспериментальных исследований получены предварительные результаты моделирования ячеек, позволяющие рассчитать первоначальные габариты требуемого лабораторного оборудования и выбрать режимные параметры для экспериментального исследования процесса очистки светлых масел.

Для подтверждения и верификации математического моделирования ячейки экстрактора изготовлены лабораторные экстракторы, внутренними диаметрами 45 и 100 мм (рис. 7).

Аппараты представляют собой стеклянные вертикальные колонны, в которые установлены блоки из вращающихся и неподвижных дисков. Диски установлены между шпилек, закрепленных в соответствующих решетках. Блок является разборным. Таким образом, в экстракторе можно изменять расстояние между дисками и их число. Вал через сальниковое уплотнение выводится наружу и подключается к приводу.



а) *б*)

Рис. 6. Результаты моделирования ячейки экстрактора с распределением векторов скорости (*а*) и линий тока (*б*) в ячейке

а) *б*)

Рис. 7. Фотографии лабораторных экстракторов с внутренним диаметром 45 (*а*) и 100 мм (*б*)

Сконструированные аппараты позволят глубже рассмотреть проблематику экстракционной очистки светлых масел комплексом на основе хлористого алюминия, определить основные показатели качества работы установки.

В результате экспериментального изучения распределения многофазного потока в ячейке будет проведено сопоставление результатов пилотных исследований математического моделирования. Кроме этого можно определить возможность применения зависимости (5) при расчете данного типа оборудования, а также границы ее применимости и возможные поправки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, договор 02.G25.31.0165 от 01 декабря 2015 г. «Создание высокотехнологичного производства неканцерогенных масел-пластификаторов для шин, каучуков и пластиков на основе инновационной технологии глубокой переработки отходов нефтяной промышленности».

Список литературы

1. Трейбал, Р. Е. Жидкостная экстракция: пер. с англ. / Р. Е. Трейбал ; под ред. С. З. Кагана. – М. : Химия, 1966. – 724 с.

2. Карпачева, С. М. Пульсационная аппаратура в химической технологии / С. М. Карпачева, Б. Е. Рябчиков. – М. : Химия, 1983. – 224 с.

3. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: учеб. пособие / С. А. Ахметов [и др.]. – СПб. : Недра, 2006. – 868 с.

4. Лаптев, А. Г. Модели переноса и эффективность жидкостной экстракции / А. Г. Лаптев. – Казань : Казанский гос энерг ун-т, 2005. – 229 с.

5. Grace, J. R. Shapes and Velocitiens, of Single Drops and Bubbles Moving Freely Through Immiscible Liquids/ J. R. Grace, T. Wairegi, T. H. Nguyen // Trans. Inst. Chem. Eng. – 1976. – Vol. 54, No. 3. – P. 167 – 173.

6. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / под ред. П. Г. Романкова. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1990. – 272 с.

7. Камалиев, Т. С. Кинетика массопереноса и эффективность смесительно-отстойных и тарельчатых аппаратов в процессах жидкостной экстракции : дис. … канд. техн. наук : 05.17.08 / Камалиев Тимур Сайфутдинович. – Казань, 2014. – 198 с.

8. Ульянов, В. М. Технологические расчеты машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств. Примеры и задачи / В. М. Ульянов, А. А. Сидягин, В. А. Диков. – Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексеева, 2015. – 633 с.

Prospects of Application of Rotary Disk Apparatus for Heterogeneous Extraction Processes in Petrochemical and Petroleum Refining Industries

A. A. Schepalov[1], D. E. Sukhanov[2], A. V. Stepykin[2], A. S. Novoselov[3], E. S. Kotlova[3]

Management Company of Orgkhim Biochemical Holding (1), Nizhny Novgorod, Russia;
Department of Technology and Equipment for Chemical and Food Industries (2), Dzerzhinsk Polytechnic Institute (branch), Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Dzerzhinsk, Russia; Stepykin.dpi-ngtu@yandex.ru;
Scientific Research Institute of Chemistry (3), N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

Keywords: hydrodynamics; mass transfer; mass transfer; oil refining; petrochemistry; solid phase extraction; extraction.

Abstract: The prospects of using the rotary-disk apparatus under conditions of solid-phase extraction are considered. The main technological process under consideration is the ALBUS-1 technology, which is aimed at processing oil industry wastes into light oil-fillers for plastic polymeric materials and aromatic oil-fillers for rubbers. One of the stages of the developed technology is the extraction purification of raw materials by a complex based on aluminum chloride, aimed at obtaining light-colored fillers. The choice of a rotary disk extractor for the considered separation process, taking into account the characteristics of the medium under study, is substantiated. The approaches to the calculation and modeling of the apparatus are empirical and numerical. The objectives of the study are to determine the applicability of the calculation methods and to select the most adequate model of the process for further research. Laboratory extractors developed on the basis of preliminary calculations are described.

References

1. Treybal R.Ye., Kagan S.3. [Ed.]. *Zhidkostnaya ekstraktsiya* [Liquid Extraction], Moscow: Khimiya, 1966, 724 p. (In Russ.)

2. Karpacheva S.M., Ryabchikov B.Ye. *Pul'satsionnaya apparatura v khimicheskoy tekhnologii* [Pulsation Apparatus in Chemical Technology], Moscow: Khimiya, 1983, 224 p. (In Russ.)

3. Akhmetov S.A. [Ed.], Serikov T.P., Kuzeyev I.R., Bayazitov M.I. *Tekhnologiya i oborudovaniye protsessov pererabotki nefti i gaza* [Technology and Equipment for the Processing of Oil and Gas], St. Petersburg: Nedra, 2006, 868 p. (In Russ.)

4. Laptev A.G. *Modeli perenosa i effektivnost' zhidkostnoy ekstraktsii* [Transfer Models and Efficiency of Solvent Extraction], Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet, 2005, 229 p. (In Russ.)

5. Grace J.R., Wairegi T., Nguyen T.H. Shapes and velocitiens, of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquids, *Trans. Inst. Chem. Eng*., 1976, vol. 54, no. 3, pp. 167-173.

6. Romankov P.G. [Ed.]. *Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam v laboratorii protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Guide to Practical Exercises in the Laboratory of Processes and Devices of Chemical Technology], Leningrad: Khimiya, 1990, 272 p. (In Russ.)

7. Kamaliyev T.S. *PhD Dissertation* (*Technical*), Kazan', 2014, 198 p. (In Russ.)

8. Ul'yanov V.M., Sidyagin A.A., Dikov V.A. *Tekhnologicheskiye raschety mashin i apparatov khimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv. Primery i zadachi* [Technological Calculations of Machines and Apparatuses of Chemical and Oil Refining Industries. Examples and Objectives], Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. R. Ye. Alekseyeva, 2015, 633 p. (In Russ.)

Perspektiven der Anwendung der Dreh-und Scheibengeräte für heterogene Extraktionsprozesse in Erdölraffinerien und petrochemischen Betrieben

Zusammenfassung: Es ist die Frage nach den Perspektiven des Einsatzes von Drehscheibengeräten unter Bedingungen der Festphasenextraktion betrachtet. Der wichtigste technologische Prozess, der in Betracht gezogen wird, ist die ALBUS-1 Technologie, die auf die Verarbeitung der Abfälle aus der Ölindustrie zu hellen Ölfüllstoffen für plastische polymere Kunststoffe und aromatische Ölfüllstoffe für Kautschuke gezielt ist. Eine der Stufen der entwickelten Technologie ist die Extraktionsreinigung von Rohstoffen durch einen Komplex auf der Basis von Aluminiumchlorid, um hellfarbige Ölfüllstoffe zu erhalten. Die Wahl eines Rotationsscheiben-Extrakteurs für den betrachteten Trennungsprozess unter Berücksichtigung der Eigenschaften des untersuchten Mediums ist begründet. Die derzeit verwendeten Ansätze für die Berechnung und Modellierung der Vorrichtung werden angegeben: empirische und numerische. Die Aufgabe der Studie ist die Bestimmung der Anwendbarkeit von Berechnungsmethoden, die Auswahl des am besten geeigneten Prozessmodells für die weitere Forschung. Es sind die auf Basis von vorläufigen Berechnungen entwickelten Laborextraktoren beschrieben.

Perspectives de l'utilisation des machines à disques rotatifs pour les procédés d'extraction hétérogènes dans les industries pétrochimiques et pétrolières

Résumé: Est examinée la question de la perspective de l'utilisation des appareils à disques rotatifs dans des conditions d'extraction en phase solide. La technologie ALBUS-1, qui vise à recycler les déchets de l'industrie pétrolière dans des huiles légères pour les matières plastiques et les huiles aromatiques pour les caoutchoucs, est le principal procédé considéré. L'une des étapes de la technologie éllaborée est le traitement d'extraction des matières premières par un complexe à base de l'aluminium de chlorure visant à obtenir des huiles légères de chargement. Est justifié le choix de l'extracteur de

disque pour le processus de la séparation en question, en tenant compte des caractéristiques de l'environnement. Sont citées les approches pour le calcul et le modèle de l'appareil actuellement utilisé: empiriques et numériques. L'objectif de l'étude est de déterminer l'applicabilité des méthodes de calcul, de choisir le modèle de processus le plus approprié pour les études ultérieures. Sont décrits les extracteurs de laboratoire conçus à la base des calculs préliminaires.

Авторы: ***Щепалов Александр Александрович*** – кандидат химических наук, руководитель блока по развитию нефтехимии дирекции по развитию и маркетингу, АО «Управляющая компания «Биохимического холдинга «Оргхим», г. Нижний Новгород, Россия; ***Суханов Дмитрий Евгеньевич*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование химических и пищевых производств»; ***Степыкин Антон Викторович*** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование химических и пищевых производств», Дзержинский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», г. Дзержинск, Россия; ***Новоселов Артем Сергеевич*** – младший научный сотрудник, НИИ Химии; ***Котлова Елена Сергеевна*** – кандидат химических наук, научный сотрудник, НИИ Химии, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, Россия.

Рецензент: ***Промтов Максим Александрович*** **–** доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.