

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО АППАРАТА РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИЙ

А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева, Р.Я. Исхакова

Анатолий Григорьевич Лаптев (ORCID 0000-0002-1626-6458), Регина Яновна Исхакова (ORCID 0000-0003-0339-9849)\*

Кафедра технологий в энергетике и нефтегазопереработке, Казанский государственный энергетический университет, Красносельская, 51, Казань, Российская Федерация, 420066  
E-mail: tvt\_kgeu@mail.ru, imreginaiskh@gmail.com\*

Елена Анатольевна Лаптева (ORCID 0000-0001-6811-6219)

Кафедра энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Казанский государственный энергетический университет, Красносельская, 51, Казань, Российская Федерация, 420066  
E-mail: grivka100@mail.ru

*Рассмотрена и решена научно-техническая задача разделения эмульсий вода – нефтепродукты на промышленных предприятиях нефтегазохимического комплекса и в энергетике. Представлена разработанная авторами конструкция комбинированного аппарата с тремя секциями разделения. В первой секции барботажной флотации преимущественно выделяются мелкие капли с близкой плотностью к сплошной среде за счет турбулентной миграции к поверхностям пузырей. Во второй секции расположен физический коагулятор в виде нерегулярной (хаотичной) насадки, материал которой хорошо смачивается углеводородной фазой. На поверхности насадки происходит осаждение и укрупнение мелких капель, которые далее поступают в секцию с плоскопараллельными наклонными пластинами, где осаждаются за счет силы тяжести. Для расчета эффективности разделения эмульсии для каждой секции представлены математические модели и даны расчетные выражения. В барботажной секции рассмотрены инерционный и турбулентный механизмы столкновения дисперсной фазы (капель) с поверхностью пузырей. Даны выражения для расчета эффективности разделения эмульсий с учетом этих механизмов. Основными параметрами в представленных выражениях являются число Стокса и коэффициент средней скорости турбулентной миграции капель к поверхности пузырей. В физическом насадочном коагуляторе основным механизмом является градиентно-турбулентная миграция капель к поверхности насадочных тел. После укрупнения капли имеют диаметр 3-4 мм и далее поступают и осаждаются на пластины тонкослойной секции за счет силы тяжести. Представлено выражение для определения эффективности коагуляции и результаты расчета в зависимости от длины насадочного коагулятора при различных числах Рейнольдса. Также представлены значения перепада давления насадочной секции. Кратко дан пример применения разработанного аппарата для выделения углеводородной фазы из воды на тепловой станции. Показан вариант модернизации технологической схемы очистки сточных вод от нефтепродуктов с применением комбинированного аппарата разделения эмульсий.*

**Ключевые слова:** водо-нефтяная эмульсия, разделение эмульсий, барботажная флотация, физическая коагуляция, тонкослойное отстаивание, определение эффективности

### Для цитирования:

Лаптев А.Г., Лаптева Е.А., Исхакова Р.Я. Определение эффективности комбинированного аппарата разделения эмульсий. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 112–120

### For citation:

Laptev A.G., Lapteva E.A., Iskhakova R.Ya. The efficiency determination of the combined emulsion separator. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 5. P. 112–120

## THE EFFICIENCY DETERMINATION OF THE COMBINED EMULSION SEPARATOR

A.G. Laptev, E.A. Lapteva, R.Ya. Iskhakova

Anatoly G. Laptev (ORCID 0000-0002-1626-6458), Regina Ya. Iskhakova (ORCID 0000-0003-0339-9849)\*  
Department of Technologies in Energy, Oil and Gas Processing, Kazan State Power Engineering University,  
Krasnoselskaya st., 51, Kazan, 420066. Russia  
E-mail: tvt\_kgeu@mail.ru, imreginaiskh@gmail.com\*

Elena A. Lapteva (ORCID 0000-0001-6811-6219)  
Department of Power Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power  
Engineering University, Krasnoselskaya st., 51, Kazan, 420066, Russia  
E-mail: grivka100@mail.ru

*The scientific and technical problem of separation of emulsions water - oil products at industrial enterprises of the petrochemical complex and in the power industry is considered and solved. The design of a combined apparatus with three separation sections developed by the authors is presented. In the first section of bubbling flotation, small droplets with a density close to a continuous medium are predominantly released due to turbulent migration to the surfaces of the bubbles. The second section contains a physical coalescer in the form of a chaotic (irregular) packing, the material of which is well wetted by the hydrocarbon phase. On the surface of the packing, small drops are enlarged, which then enter the section with plane-parallel inclined plates, where they are deposited due to the force of gravity. Mathematical models and calculated expressions are presented for calculation the separation efficiency of the emulsion for each section. In the bubbling section, the inertial and turbulent mechanisms of collision of the dispersed phase (drops) with the surface of bubbles are considered. Expressions are given for calculating the separation efficiency of emulsions taking into account these mechanisms. The main parameters in the presented expressions are the Stokes number and the coefficient of the average velocity of turbulent migration of droplets to the bubble surface. In a physical packed coagulator, the main mechanism is the gradient-turbulent migration of droplets to the surface of the packed bodies. After enlargement, the droplets have a diameter of 3-4 mm and then are deposited on the plates of the thin-layer section due to the force of gravity. The expression for the coagulation efficiency determination and calculation results is presented depending on the length of the packed coalescer at different Reynolds numbers. The pressure drop values of the packing section are also shown. The example of the developed apparatus application for separating the hydrocarbon phase from water at a thermal station is briefly given.*

**Key words:** water-oil emulsion, emulsions separation, bubble flotation, physical coagulation, thin-layer sedimentation, efficiency determination

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема разделения водо-нефтяных эмульсий имеет особую актуальность при проведении химико-технологических процессов на предприятиях нефтехимии и энергетики [1, 2]. Разделение нефти и воды является мировой проблемой из-за постоянно растущего количества нефтесодержащих промышленных сточных вод и загрязненных природных вод, а также учащения аварийных разливов нефти. Загрязнение нефтепродуктами природных вод происходит в результате разнообразных процессов в нефтехимической, текстильной, пищевой промышленности, на тепловых электрических станциях, а также в связи с частыми аварийными разливами нефти во время ее добычи на шельфе или в процессе транспортировки [3, 4].

Известны различные способы разделения водо-нефтяных эмульсий [5-7]. Однако, многие традиционные методы разделения подобных эмульсий часто характеризуются недостаточной эффективностью, высокими энергетическими затратами и привносимым вторичным загрязнением в окружающую среду, поэтому зарубежными и отечественными исследователями выполняются теоретические и экспериментальные исследования и разработка новых конструкций аппаратов, способных устранить эти недостатки [8].

Например, для повышения эффективности разделения водонефтяной эмульсии в работе [9] разработана новая флотационная колонна с микропузырьками в циклонном режиме для повышения эффективности разделения. Флотационная колонна

включает колонный и циклонный сепараторы, расположенные на нижней пластине флотационного аппарата. Сравнивали эффективность процесса флотационной колонны с микропузырьками в циклонном состоянии и флотационной колонны с растворенным воздухом. Результаты показывают, что этот первый процесс имеет более высокую эффективность извлечения нефтепродуктов и очищенную воду с более низким содержанием нефти. Эффективность удаления нефти, равная 92,19%, была получена с очищенными сточными водами, содержащими конечную концентрацию нефти 37,10 мг/л.

В работе [10] проведено сравнение эффективности двух типов коалесцеров: вставки из высокопористого материала и плоских перегородок с применением метода физического эксперимента. Установлено, что использование их в отстойнике позволяет повысить эффективность и скорость разделения водонефтяных эмульсий при увеличении концентрации нефти в исходной смеси с 15 до 25%. Экспериментальные исследования также показывают, что наиболее эффективными коалесцерами являются плоские перегородки, из-за того, что ячейки быстро забиваются тяжелыми нефтяными компонентами, что приводит к более сложной структуре потока через них.

В процессе выделения нефти из водо-нефтяной эмульсии [11] используется аппарат с ограниченным пространством, представляющий тонкий проточный канал, в котором расположены две параллельные пластиковые пластины (аналог тонкослойного разделения). Пространство между двумя пластинами довольно узкое для повышения частоты столкновений капель нефти с поверхностью пластины. Капли нефти сливаются на поверхности пластины. Использовались три типа материалов пластин: полипропилен, политетрафторэтилен и нейлон. Установлено, что полипропилен является лучшим с точки зрения эффективности отделения капель нефти.

Авторами [12] предложен мембранный аппарат, который обеспечивает гравитационное разделение различных водно-нефтяных смесей. Данный метод позволяет производить разделение эмульсий, когда сплошной фазой является как вода, так и нефть с эффективностью разделения  $\geq 99,9\%$ .

В последнее время перспективным является использование гидрофобных губчатых материалов в качестве адсорбционных материалов для разделения водонефтяной эмульсии [13, 14]. Данные материалы способны разделять водо-нефтяные эмульсии, стабилизированные поверхностно-активными веществами.

Еще одним направлением является использование нановолокон, собранных в монолитную ячеистую структуру и предназначенных для разделения эмульсий вода-нефть, стабилизированных поверхностно-активными веществами [15-17].

Деэмульгирование и обезвоживание сырой нефти являются важными звеньями в процессе добычи, транспортировки и переработки сырой нефти. В последние годы, с развитием добычи сырой нефти, содержание коллоидов и асфальтенов в сырой нефти увеличивалось, а свойства эмульсии нефти стали более стабильными. Кроме того, разработка и применение технологии добычи нефти и использование большого количества нефтепромысловых химикатов усложнили состав сырой нефти. Обводненность и высокое солесодержание нефти усложняет задачу ее обезвоживания и опреснения. Проведены исследования по обезвоживанию сырой нефти с помощью ультразвука [18]. По результатам исследований установлено, что ультразвук подходит для деэмульгирования и обезвоживания эмульсий с высоким содержанием воды.

Таким образом, разделение эмульсий имеет важное значение как в процессах химической технологии на различных промышленных предприятиях, так и в энергетике на тепловых станциях. Причем могут решаться как технологические задачи, так и задачи охраны окружающей среды. Большинство аппаратов разделения эмульсий сочетает две или более зон очистки, т.е. являются комбинированными. Разделение эмульсий осложняется их устойчивостью, небольшой разностью плотностей фаз и малыми размерами капель.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эффективность разделения эмульсий для всего аппарата при постоянном расходе смеси определяется по выражению

$$\eta = \frac{C_H - C_K}{C_H}, \quad (1)$$

где  $C_H$ ,  $C_K$  – начальная и конечная концентрация дисперсной фазы в эмульсии.

При очистке смеси в нескольких зонах (секциях) аппарата эффективность записывается по правилу

$$\eta = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \eta_i) = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_i) \dots (1 - \eta_n), \quad (2)$$

где  $\eta_i$  – эффективность очистки в  $i$ -ой секции;  $n$  – число секций.

Целью данной статьи является представление конструкции комбинированного аппарата разделения эмульсий, разработанного авторами. На

основе математических моделей функционирования секций предложен порядок и представлены результаты расчета эффективности аппарата по секциям и в целом на примере тепловой станции

Комбинированный аппарат разделения эмульсий содержит секцию флотационной очистки, секцию с хаотичной насадкой и секцию тонкослойного отстаивания [19]. В первой секции флотационной очистки удаляются преимущественно капли, имеющие плотность, близкую к плотности сплошной фазой. В следующей секции с насадочным физическим коагулятором происходит укрупнение мелких капель для последующего осаждения в секции тонкослойного отстаивания. В секции тонкослойного отстаивания расположены плоские параллельные пластины тонкослойного отстойника под углом  $45^\circ$ - $60^\circ$ .

Таким образом, повышение эффективности разделения достигается применением секции барботажного флотатора, секции коагуляции, загруженной хаотично насадками, в которой происходит укрупнение капель эмульсий за счет инерционных и турбулентных механизмов, и укрупненные капли далее выносятся потоком сплошной фазы для гравитационного осаждения в зону тонкослойного отстаивания.

На рис. 1 представлен разработанный комбинированный аппарат разделения эмульсий.

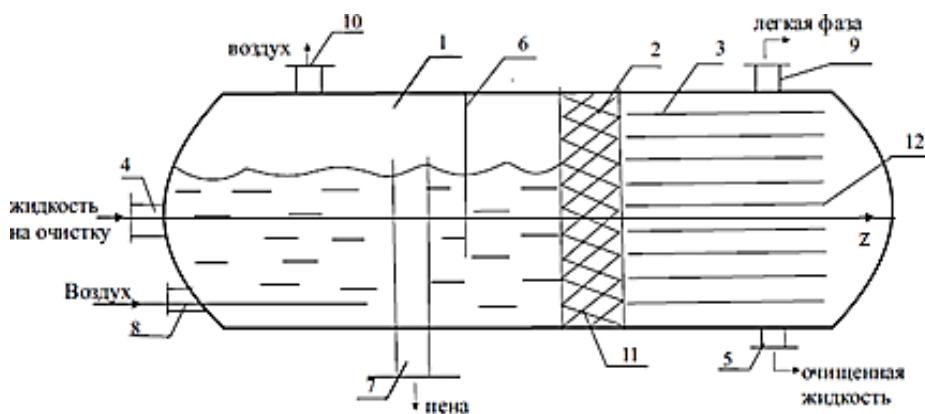


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата [16]. 1 – секция флотации; 2 – хаотичный физический коагулятор; 3 – секция тонкослойного отстаивания; 4,5 – патрубки для входа эмульсии и выхода очищенной жидкости; 6 – перегородка; 7 – выход пены; 8 – вход воздуха; 9 – выход легкой фазы; 10 – выход воздуха; 11 – секция с насадкой; 12 – пластины тонкослойного отстойника (ось  $z$  – направление движения жидкости)  
Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus [16]. 1 - flotation section; 2 - chaotic physical coagulator; 3 - section of thin-layer sedimentation; 4,5 - branch pipes for the inlet of the emulsion and the outlet of the purified liquid; 6 - partition; 7 - foam outlet; 8 - air inlet; 9 - light phase outlet; 10 - air outlet; 11 - nozzle section; 12 - plates of a thin-layer sedimentation tank

Далее представлены математические модели для расчета каждой секции комбинированного аппарата.

#### Расчет барботажной секции очистки

Флотационная эффективность очистки взвешенных гидрофобных частиц (капель эмульсии) зависит от интенсивности столкновения с поверхностью пузырька и последующей седиментации. Флотация применяется при разделении водных эмульсий при поверхностном натяжении воды  $\sigma > 0,06$  Н/м. Флотация происходит за счет трех основных механизмов осаждения: зацепления, инерционного столкновения и турбулентной диффузии (миграции) капель.

Каждый механизм осаждения имеет свое математическое описание и расчетные выражения интенсивности флотации. Расчет эффективности флотации в зависимости от размера капель может проводиться пофракционно.

Для определения профиля концентрации капель по длине флотационной секции можно использовать однопараметрическую диффузионную модель с объемным источником оседающих на пузырьки капель. Это выражение имеет вид

$$u_{\text{ж}} \frac{dC}{dz} = D_{\text{п}} \frac{d^2C}{dz^2} + ja_{\text{в}}/\rho_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где  $u_{\text{ж}}$  – средняя скорость жидкости (сплошной среды), м/с;  $C$  – концентрация капель, кг/кг;  $z$  – продольная координата, м;  $a_{\text{в}}$  – удельная поверхность пузырей,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $j$  – удельный поток массы оседающих капель на пузырьки,  $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$ ;  $D_{\text{п}}$  – коэффициент продольного (обратного) перемешивания,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность сплошной среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

К уравнению (3) записываются граничные условия Данквертса.

Поток массы капель вычисляется по соответствующим выражениям в зависимости от механизма флотации и связан с коэффициентом скорости переноса капель и концентрацией.

Удельная поверхность пузырей ( $a_{\text{в}} = 6\phi_{\Gamma}/d_{\text{п}}$ ) зависит от диаметра отверстий в трубах барботера и объемного расхода воздуха и вычисляется по полумпирическим выражениям, где  $d_{\text{п}}$  – средний поверхностно-объемный диаметр пузырей, м;  $\phi_{\Gamma}$  – среднее газосодержание слоя,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

В упрощенной форме локальная эффективность инерционного осаждения капель на пузырьки записывается по известному выражению

$$\eta_u = \left( \frac{St}{St + 0,35} \right)^2, \quad (4)$$

где  $St = 2Ur_c^2|\Delta\rho|/(9R\mu_{ж})$  – число Стокса;  $U$  – средняя скорость всплытия пузырька, м/с;  $r_c$  – радиус капли, м;  $R$  – радиус пузырька, м;  $\mu_{ж}$  – коэффициент динамической вязкости сплошной среды, Па·с;  $\Delta\rho$  – разность плотностей фаз, кг/м<sup>3</sup>.

Как следует из выражения (4), эффективность существенно зависит от радиуса капли и разности плотностей фаз. Например, при  $r_c = 10^{-3}$  м;  $\Delta\rho = 100$  и  $R = 3 \cdot 10^{-3}$  эффективность составляет  $\eta_u \approx 0,7$  (70%).

При уменьшении радиуса капли эффективность инерционного осаждения резко снижается. При  $r_c = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м эффективность  $\eta_u \approx 0,32$  (32%).

Отсюда следует, что для мелких капель важным механизмом является скорость турбулентной миграции и осаждения капель на поверхность пузырька. Всплывающие пузырьки образуют вихревой след и турбулизируют сплошную фазу, за счет турбулентных пульсаций происходит миграция капель к поверхности пузырей и прилипание. Можно оценить размер капель не увлекаемых турбулентными пульсациями среды по выражению [20]

$$r_c > 6,7 \sqrt{\frac{R\mu_{ж}}{|\Delta\rho|u_*}}, \quad (5)$$

где  $u_*$  – динамическая скорость на поверхности

пузырей в барботажном слое  $u_* = 2,2 \left[ v_{ж} g w_{г} (1 - \varphi_{г})^2 \right]^{0,25}$ ,  $w_{г}$  – скорость газа на полное сечение флотатора, м/с;  $v_{ж}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкой фазы, м<sup>2</sup>/с.

Расчет показывает, что при  $R = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $w_{г} = 0,1$  м/с;  $\Delta\rho = 100$  кг/м<sup>3</sup> значение  $r_c = 4 \cdot 10^{-3}$  м, т.е. капли радиусом более 4 мм не увлекаются турбулентными пульсациями среды и основной механизм их осаждения инерционный.

Для определения эффективности флотации капель, которые полностью или с некоторой инерционностью увлекаются турбулентными пульсациями среды, из аппроксимации уравнения (3) в виде ячеечной модели получено выражение [20]

$$\eta_{г} = 1 - \left( 1 + \frac{3\beta_d \varphi_{г} H}{Ru_{ж}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\beta_d$  – коэффициент средней скорости турбулентной миграции капель, м/с;  $H$  – длина секции флотатора, м.

Значение  $\beta_d$  вычисляется по формуле [20]

$$\beta_d = \frac{2,2 \left[ v_{ж} g w_{г} (1 - \varphi_{г})^2 \right]^{0,25}}{(1 + \omega_E \tau_p) [R_1 \ln(R_2 / R_1) + 2,5 \ln(R_δ / R_2)]}, \quad (7)$$

где  $R_1, R_2, R_δ$  – безразмерные параметры пограничного слоя на пузырьке ( $R_1 \approx 6,0$ ;  $R_2 \approx 15$ ;  $R_δ \approx 25-35$ ).

Выражение (7) можно записать в упрощенном виде:

$$\beta_d = 0,3 \left[ v_{ж} g w_{г} (1 - \varphi_{г})^2 \right]^{0,25} (1 + \omega_E \tau_p)^{-1}, \quad (8)$$

где  $\omega_E = u_*/0,1R$  – частота энергоемных пульсаций, м/с;  $\tau_p = 4r_c^2|\Delta\rho|/18\mu_{ж}$  – время релаксации капли, с.

Таким образом, приведенные выражения (4) и (6) позволяют вычислять эффективность флотации в зависимости от механизмов осаждения капель на пузырьки.

#### Расчет насадочного физического коагулятора

Мелкие капли в эмульсии, которые проскочили без контакта секцию флотационной очистки, поступают в секцию с нерегулярной насадкой, где происходит их укрупнение. Материал насадки выбирается исходя из смачивания поверхности нефтепродуктами. Основным механизмом осаждения мелких капель (< 200 мкм) на поверхности насадки является турбулентная миграция. Известно, что в хаотичной насадке турбулентный режим начинается при числе Рейнольдса  $Re_3 = u_{ж} d_3 / \nu_{ж} > 40$ , где  $u_{ж}$  – скорость среды в слое насадки, м/с;  $d_3$  – эквивалентный диаметр насадки, м.

Удельный поток массы капель записывается в виде  $j = \beta_d \Delta C$ , где  $\beta_d$  – коэффициент средней скорости турбулентной миграции, м/с;  $\Delta C = C_{\infty} - C_{гп}$  – разность концентраций, принимается  $C_{гп} = 0$ , т.к. прилипнув к насадке капля покинула несущий поток. Для расчета коэффициента  $\beta_d$  разработана математическая модель [21]. Профиль концентрации капель по длине секции насадки также можно определить из решения диффузной модели (3), где в правой части будет удельная поверхность насадки  $a_v$ , а коэффициент перемешивания в хаотичной насадке [20]  $D_{п} = 1,92 v_{ж} Re_3^{0,75} \xi^{0,25}$ , где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления насадки.

Из аппроксимации диффузионной модели (3) ячейечной моделью получено выражение для расчета эффективности коагуляции [21]

$$\eta = 1 - \exp \left[ - \frac{H - 5d_3}{\frac{1}{St_d a_v} + \frac{4d_3}{Pe_3}} \right], \quad (9)$$

где  $St_d = \beta_d / u_{ж}$  – среднее число Стантона переноса

капель в насадке;  $a_v$  – удельная геометрическая поверхность насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $Re_3$  – число Пекле структуры потока:  $Pe_3 = 0,52(Re_3/\xi)^{0,25}$  [21].

Число Стантона для капель вычисляется по выражению [21]

$$St_d = \frac{1,55\xi^{0,25}}{Re_3^{0,25}(1 + \omega_E \tau_p) [0,4Re_3^{0,25}\xi^{-0,25} + 2,5\ln(Re_3^{0,25}\xi^{0,5})]} \quad (10)$$

где коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi$  находится для каждой конструкции хаотичной насадки экспериментально. Например, для колец Рашига известно выражение, полученное Н.М. Жаворонковым и др.  $\xi = 16/Re_3^{0,2}$ .

На рис. 2 в качестве примера даны результаты расчетов эффективности коагуляции (9) и значение перепада давления при выделении из воды широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) в зависимости от длины насадочной секции. Из расчетов следует, при  $H > 0,4$  м эффективность коагуляции составляет  $\eta > 0,95$ , что является вполне достаточным при коагуляции капель в эмульсии в насадочной секции.

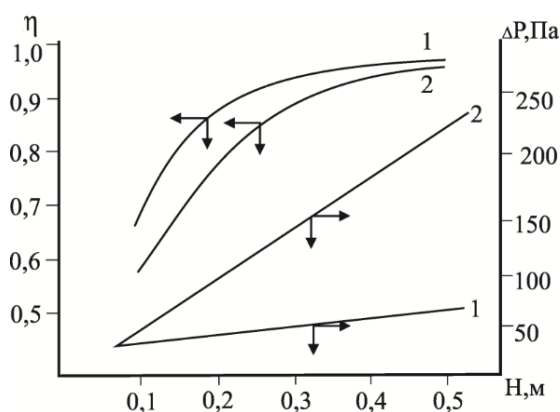


Рис. 2. Эффективность коагуляции капель воды в ШФЛУ от длины хаотичного слоя (насадка: кольца Рашига  $15 \times 15 \times 2$  мм) с учетом перепада давления  $\Delta P$ , Па; 1 –  $Re_3 = 500$ ; 2 –  $Re_3 = 1000$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\text{мПа}\cdot\text{с}$ ;  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\text{Н}/\text{м}$ ;  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu\text{км}$ )

Fig. 2. Coagulation efficiency of water droplets in broad fraction of light hydrocarbons on the length of the chaotic layer (nozzle: Raschig rings  $15 \times 15 \times 2$  mm) with the pressure drop  $\Delta P$ , Pa; 1 –  $Re = 500$ ; 2 –  $Re = 1000$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\text{N}/\text{m}$ ;  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mu\text{km}$ )

#### Секция тонкослойного отстаивания

После насадочного коагулятора укрупненные капли поступают на тонкослойное разделение с средним устойчивым диаметром капель, который можно вычислить по известному выражению  $d_k = 0,38\sqrt{\sigma/g|\Delta\rho|}$ , где  $\Delta\rho$  – разность плотностей сплошной и дисперсной фазы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Как следует из данного выражения при  $\Delta\rho \approx 100$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , диаметр

капли  $d_k \approx 2 \cdot 10^{-3}$ , м. Такие капли достаточно эффективно будут осаждаться на пластины за счет силы тяжести.

Расстояние между пластинами 20-60 мм в зависимости от расхода сплошной среды с организацией ламинарного режима (для каналов прямоугольного сечения  $Re < 2800$ ;  $Re = u_{ж} 2h/\nu_{ж}$ ,  $h$  – расстояние между пластинами, м).

Расчет гравитационного осаждения капель на пластины тонкослойной секции выполняется по известным зависимостям [22, 23].

При ламинарном режиме движения жидкости между пластинами практически идеальное вытеснение потока ( $H \gg h$ ). Известное решение уравнения (3) при  $D_n = 0$  имеет вид

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{u_{ос} F}{V_{ж}}\right), \quad (11)$$

где  $u_{ос}$  – средняя скорость осаждения капель,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $F$  – поверхность осаждения,  $\text{м}^2$ ;  $V_{ж}$  – объемный расход жидкости в канале между пластинами,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

При  $F = bH$ ,  $b$  – ширина пластины, м;  $V_{ж} = bhu_{ср}$  выражение (11) получит форму

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{u_{ос} H}{hu_{ср}}\right). \quad (12)$$

Полученное упрощенное выражение позволяет в явном виде вычислить эффективность сепарации капель в секции тонкослойного отстаивания.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты по приведенным выражениям эффективности по секциям и общей эффективности (2) ( $n = 3$ ) показывают, что комбинированный аппарат обеспечивает эффективность разделения эмульсий около 99,8-99,9%. Длина аппарата составляет не более 3-4 м, а диаметр зависит от расхода эмульсий на разделение.

Разработан вариант модернизации технологической схемы очистки сточных вод от нефтепродуктов на Казанской ТЭЦ-1. Технологическая схема состоит из буферных емкостей, флотатора, трехступенчатого электронейтрализатора и механических фильтров (рис. 3). Максимальный расход загрязненных сточных вод  $52,25 \text{ м}^3/\text{ч}$  с начальной концентрацией  $3,2 \text{ мг}/\text{л}$ . Эффективность очистки составляет не более 86%. Отходом очистных сооружений являются флотационные воды с нефтепродуктами.

Как показывают расчеты по приведенной математической модели, в результате замены флотатора 2 и трехступенчатого электронейтрализатора 3 на комбинированный аппарат (рис. 1) в тех-

нологической схеме (рис. 4) снижается концентрация нефтепродуктов с 0,16 до 0,1 мг/л. Кроме этого, за счет исключения электронейтрализаторов, обеспечивается экономия электроэнергии равная 65700 кВт.

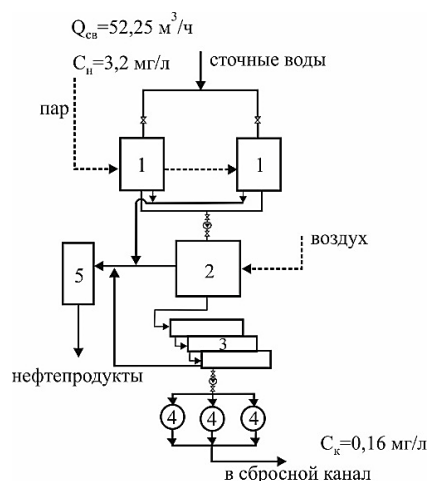


Рис. 3. Существующая схема очистки сточных вод от нефтепродуктов на Казанской ТЭЦ-1: 1 – приемный буферный бак, 2 – флотатор, 3 – трехступенчатый электронейтрализатор, 4 – механический фильтр, загруженный антрацитом, 5 – мазутоприемник

Fig. 3. The actual scheme of wastewater treatment from oil products at the Kazan heat power station -1: 1 - receiving buffer tank, 2 - skimmer, 3 - three-stage electrical neutralizer, 4 - mechanical filter loaded with anthracite, 5 - fuel oil receiver

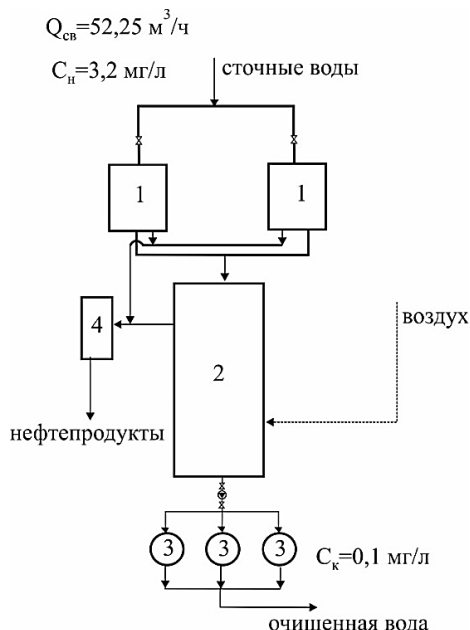


Рис. 4. Модернизированная схема очистки сточных вод от нефтепродуктов очистных сооружений Казанской ТЭЦ-1: 1 – приемный буферный бак, 2 – комбинированный сепаратор, 3 – механический фильтр, загруженный антрацитом, 4 – мазутоприемник

Fig. 4. Modernized scheme of wastewater treatment from oil products of treatment facilities of the Kazan heat power station -1: 1 - receiving buffer tank, 2 - combined separator, 3 - mechanical filter loaded with anthracite, 4 - fuel oil receiver

## ВЫВОДЫ

В связи с повышением требований к энерго- и ресурсоэффективности оборудования на предприятиях химической промышленности и энергетики, а также к снижению техногенного воздействия на окружающую среду, проектирование и модернизация аппаратов и технологических схем приобретает все большую актуальность. Необходимыми и важными инструментами для решения отмеченных задач являются методы физического и математического моделирования процессов в аппаратах. Применяются как численные, так и приближенные методы математического моделирования.

Известно, что физический процесс в аппарате имеет несколько иерархических уровней, обусловленных различными пространственно-временными масштабами. В данной статье рассматриваются уровни двух масштабов — явления переноса капель в эмульсиях к поверхности пузырей и хаотичной насадке и уровень масштаба аппарата – т.е. всего флотатора и хаотичного насадочного слоя – коагулятора. Процессы переноса на каждом уровне имеют свою форму математического описания, и взаимодействие между уровнями учитывается параметрически. Например, в дифференциальном уравнении (3) такими параметрами являются коэффициент обратного перемешивания и коэффициент турбулентной миграции капель с поверхности пузырька или насадки.

В статье показано, что расчет комбинированного аппарата разделения эмульсий с применением математического описания по секциям обеспечивает выбор режимных и конструктивных характеристик в зависимости от условий и требований приведенного процесса.

Представленные авторами математические модели применяются для расчета промышленных аппаратов, внедренных на нефтехимических предприятиях (на Сургутском заводе стабилизации конденсата, ПАО "Нижнекамскнефтехим" и др.) и обеспечивают требования технического задания по проектированию.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №18-79-10136 <https://rscf.ru/project/18-79-10136/>.*

*The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 18-79-10136 <https://rscf.ru/project/18-79-10136/>.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Синайский Э.Г., Лапига Е.А., Зайцев Ю.В.** Сепарация многофазных многокомпонентных систем. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр". 2002. 621 с.
2. **Мешалкин В.П.** Научные методы инжиниринга энергоресурсоэффективных интенсивных химико-технологических систем в условиях цифровой экономики. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 6-23. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6423.
3. **Duo Wang, Ziqian Zhao, Chenyu Qiao, Wenshuai Yang, Yueying Huang, Patrick McKay, Dingzheng Yang, Qi Liu, Hongbo Zeng.** Techniques for treating slop oil in oil and gas industry. *Fuel*. 2020. V. 279. P. 118482. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118482.
4. **Wen-ming Jiang, Yi-mei Chen, Ming-can Chen, XiaoliLiuYang Liu, Tianyu Wang, JieYang.** Removal of emulsified oil from polymer-flooding sewage by an integrated apparatus separation process. *Sep. Purif. Technol.* 2019. V. 211. P. 259-268. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.09.069.
5. **Grossmann I.E., Harjunkski I.** Process Systems Engineering: Academic and Industrial Perspectives. *Comput. Chem. Eng.* 2019. V. 126. N 12. P. 474-484. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.04.028.
6. **Лаптев А.Б., Ибрагимов Н.Г., Хафизов А.Р.** Осложнения в нефтедобыче. Уфа: ООО Изд-во науч.-техн. лит-ры «Монография». 2003. 302 с.
7. **Тимербаев А.С., Таранова Л.В.** Численное моделирование процесса разделения водонефтяных эмульсий в центробежном сепараторе. *Фунд. иссл.* 2014. № 9. С. 547-551.
8. **Захаров М.К., Писаренко Ю.А., Сычева О.И.** Сравнение способов энергосбережения при ректификации жидких смесей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 1. С. 85-92. DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6141.
9. **Xiaobing Li Hongxiang Xu Jiongtian Liu Jian Zhange Jig Li Zhaolong Gui.** Cyclonic state micro-bubble flotation column in oil-in-water emulsion separation 1. *Sep. Purif. Technol.* 2016. V. 165. P. 101-106. DOI: 0.1016/j.seppur.2016.01.021.
10. **Zinurov V., Sharipov I., Dmitrieva O., Madyshev I.** The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation. E3S Web of Conferences KTTI-2019. 2020. V. 157. DOI:10.1051/e3sconf/202015706001.
11. **Wang Shuo, Qin Wei, Dai Youyuan.** Separation of Oil Phase from Dilute Oil/Water Emulsion in Confined Space Apparatus. *Chin. J. Chem. Eng.* 2012. V. 20(2). P. 239-245. DOI: 10.1016/S1004-9541(12)60384-X.
12. **Gibum Kwon, Arun. K. Kota, Yongxin Li, Ameya Sohani, Joseph M. Mabry, Anish Tuteja.** On-Demand Separation of Oil-Water Mixtures. *Adv. Mater.* 2012. V. 24. N 27. P. 3666-3671. DOI: 10.1002/ADMA.201201364
13. **Yang Si, Qiuxia Fu, Xueqin Wang, Jie Zhu, Jianyong Yu, Gang Sun, Bin Ding.** Superelastic and superhydrophobic nanofiber-assembled cellular aerogels for effective separation of oil/water emulsions. *ACS Nano*. 2015. 9. 4. P. 3791-3799. DOI: 10.1021/nn506633b.
14. **Dong Ding, Hengyang Mao, Xianfu Chen, Minghui Qiu, Yiqun Fan.** Underwater superoleophobic-underoil superhydrophobic Janus ceramic membrane with its switchable separation in oil/water emulsions. *J. Membr. Sci.* 2018. V. 565. P. 303-310. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.08.035.

## REFERENCES

1. **Sinaisky E.G., Lapiga E.A., Zaitsev Yu.V.** Separation of multiphase multicomponent systems. M.: ООО "Nedra-Biznestsentr". 2002. 621 p. (in Russian).
2. **Meshalkin V.P.** Engineering scientific methods of energy and resource effective intensive chemical process systems in digit. economy conditions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 8. P. 6-23 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6423.
3. **Duo Wang, Ziqian Zhao, Chenyu Qiao, Wenshuai Yang, Yueying Huang, Patrick McKay, Dingzheng Yang, Qi Liu, Hongbo Zeng.** Techniques for treating slop oil in oil and gas industry. *Fuel*. 2020. V. 279. P. 118482. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118482.
4. **Wen-ming Jiang, Yi-mei Chen, Ming-can Chen, XiaoliLiuYang Liu, Tianyu Wang, JieYang.** Removal of emulsified oil from polymer-flooding sewage by an integrated apparatus separation process. *Sep. Purif. Technol.* 2019. V. 211. P. 259-268. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.09.069.
5. **Grossmann I.E., Harjunkski I.** Process Systems Engineering: Academic and Industrial Perspectives. *Comput. Chem. Eng.* 2019. V. 126. N 12. P. 474-484. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.04.028.
6. **Laptev A.B., Ibragimov N.G., Khafizov A.R.** Complications in oil production. Ufa: ООО Izd-vo nauch.-tekhn. lit-ry «Monografiya». 2003. 302 p. (in Russian).
7. **Timerbaev A.S., Taranova L.V.** Numerical simulation separation oil-water emulsions in centrifugal separator. *Fund. Issled.* 2014. N 9(3), P. 547-551 (in Russian).
8. **Zakharov M.K., Pisarenko Yu.A., Sycheva O.I.** Comparison of energy saving methods for distillation of liquid mixtures. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 1. P. 85-92 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216401.6141.
9. **Xiaobing Li Hongxiang Xu Jiongtian Liu Jian Zhange Jig Li Zhaolong Gui.** Cyclonic state micro-bubble flotation column in oil-in-water emulsion separation 1. *Sep. Purif. Technol.* 2016. V. 165. P. 101-106. DOI: 0.1016/j.seppur.2016.01.021.
10. **Zinurov V., Sharipov I., Dmitrieva O., Madyshev I.** The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation. E3S Web of Conferences KTTI-2019. 2020. V. 157. DOI:10.1051/e3sconf/202015706001.
11. **Wang Shuo, Qin Wei, Dai Youyuan.** Separation of Oil Phase from Dilute Oil/Water Emulsion in Confined Space Apparatus. *Chin. J. Chem. Eng.* 2012. V. 20(2). P. 239-245. DOI: 10.1016/S1004-9541(12)60384-X.
12. **Gibum Kwon, Arun. K. Kota, Yongxin Li, Ameya Sohani, Joseph M. Mabry, Anish Tuteja.** On-Demand Separation of Oil-Water Mixtures. *Adv. Mater.* 2012. V. 24. N 27. P. 3666-3671. DOI: 10.1002/ADMA.201201364
13. **Yang Si, Qiuxia Fu, Xueqin Wang, Jie Zhu, Jianyong Yu, Gang Sun, Bin Ding.** Superelastic and superhydrophobic nanofiber-assembled cellular aerogels for effective separation of oil/water emulsions. *ACS Nano*. 2015. 9. 4. P. 3791-3799. DOI: 10.1021/nn506633b.
14. **Dong Ding, Hengyang Mao, Xianfu Chen, Minghui Qiu, Yiqun Fan.** Underwater superoleophobic-underoil superhydrophobic Janus ceramic membrane with its switchable separation in oil/water emulsions. *J. Membr. Sci.* 2018. V. 565. P. 303-310. DOI: 10.1016/j.memsci.2018.08.035.



15. **Weitao Zhou, Yimin Zhang, Shan Du, Xiangxiang Chen, Kun Qi, Ting Wu, Jingliang Li, Shizhong Cui, Jianxin He.** Superwetable Amidoximed Polyacrylonitrile-Based Nanofibrous Nonwovens for Rapid and Highly Efficient Separation of Oil/Water Emulsions. *ACS App. Polym. Mat.* 2021. V. 3 (6). P. 3093-3102. DOI: 10.1021/acsapm.1c00313.
16. **Xianfeng Wang, Jianyong Yu, Gang Sun, Bin Ding.** Electrospun nanofibrous materials: a versatile medium for effective oil/water separation. *Materials Today.* 2016. V. 19. N 7. P. 403-414. DOI: 10.1016/j.mattod.2015.11.010.
17. **Jin Ge, Yin-Dong Ye, Hong-Bin Yao, Xi Zhu, Xu Wang, Liang Wu, Jin-Long Wang, Prof. Hang Ding, Prof. Ni Yong, Prof. Ling-Hui He, Prof. Dr. Shu-Hong Yu.** Pumping through Porous Hydrophobic/Oleophilic Materials: An Alternative Technology for Oil Spill Remediation. *Angew. Chem. Internat. Edit.* 2014. V. 53. N 14. P. 3612-3616. DOI: 10.1002/anie.201310151.
18. **Xianzhen Xu, Dan Cao, Jin Liu, Jun Gao, Xiaoyi Wang.** Research on ultrasound-assisted demulsification/dehydration for crude oil. *Ultrason. Sonochem.* 2019. V. 57. P. 185-192. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.024.
19. **Лаптев А.Г., Башаров М.М.** Эффективность теплообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса. Казань: Центр инноват. технол. 2016. 344 с.
20. **Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А.** Математические модели и методы расчетов теплообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. Казань: КГЭУ; Старый Оскол: ТНТ. 2021. 288 с.
21. **Лаптев А.Г., Башаров М.М.** Математическая модель переноса и осаждения тонкодисперсных частиц в турбулентном потоке эмульсий и суспензий. *Инж.-физич. журн.* 2018. Т. 91. № 2.С. 377-386. DOI: 10.1007/s10891-018-1756-5.
22. **Демура М.В.** Проектирование тонкослойных отстойников. Киев: Будивельник. 1981. 78 с.
23. **Покровский В.Н., Аракчеев Е.П.** Очистка сточных вод тепловых электростанций. М.: Энергия. 256 с.
15. **Weitao Zhou, Yimin Zhang, Shan Du, Xiangxiang Chen, Kun Qi, Ting Wu, Jingliang Li, Shizhong Cui, Jianxin He.** Superwetable Amidoximed Polyacrylonitrile-Based Nanofibrous Nonwovens for Rapid and Highly Efficient Separation of Oil/Water Emulsions. *ACS App. Polym. Mat.* 2021. V. 3 (6). P. 3093-3102. DOI: 10.1021/acsapm.1c00313.
16. **Xianfeng Wang, Jianyong Yu, Gang Sun, Bin Ding.** Electrospun nanofibrous materials: a versatile medium for effective oil/water separation. *Materials Today.* 2016. V. 19. N 7. P. 403-414. DOI: 10.1016/j.mattod.2015.11.010.
17. **Jin Ge, Yin-Dong Ye, Hong-Bin Yao, Xi Zhu, Xu Wang, Liang Wu, Jin-Long Wang, Prof. Hang Ding, Prof. Ni Yong, Prof. Ling-Hui He, Prof. Dr. Shu-Hong Yu.** Pumping through Porous Hydrophobic/Oleophilic Materials: An Alternative Technology for Oil Spill Remediation. *Angew. Chem. Internat. Edit.* 2014. V. 53. N 14. P. 3612-3616. DOI: 10.1002/anie.201310151.
18. **Xianzhen Xu, Dan Cao, Jin Liu, Jun Gao, Xiaoyi Wang.** Research on ultrasound-assisted demulsification/dehydration for crude oil. *Ultrason. Sonochem.* 2019. V. 57. P. 185-192. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.024.
19. **Laptev A.G., Basharov M.M.** Efficiency of heat and mass transfer and separation of heterogeneous media in apparatuses of the petrochemical complex. Kazan': tsentr innovats. tekhnol. 2016. 344 p. (in Russian).
20. **Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A.** Mathematical models and methods for calculating heat and mass transfer and separation processes in two-phase media. Kazan': KGEU; Saryi Oskol: TNT. 2021. 288 p. (in Russian).
21. **Laptev A.G., Basharov M.M.** Mathematical model of transfer and deposition of fine particles in a turbulent flow of emulsions and suspensions. *Inzh. Fizich. Zhurn.* 2018. V. 91. N 2. P. 377-386 (in Russian). DOI: 10.1007/s10891-018-1756-5.
22. **Demura M.V.** Design of thin-layer sedimentation tanks. Kiev: Budivelnik. 1981. 78 p. (in Russian).
23. **Pokrovsky V.N., Arakcheev E.P.** Wastewater treatment of thermal power plants. M.: Energiya. 256 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 09.11.2021  
Принята к опубликованию 28.03.2022

Received 09.11.2021  
Accepted 28.03.2022