

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД В ТОНКОСЛОЙНЫХ ОТСТОЙНИКАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Анатолий Г. Л., Башаров М. М.,
Исхакова Р. Я.

Актуальность данного исследования заключается в минимизации антропогенного воздействия загрязненных водных сред на окружающую природную среду путем разработки и применения новых математических моделей с целью оптимизации процессов проектирования аппаратов очистки сточных вод и технологических жидкостей. Авторами получены выражения для определения эффективности сепарации эмульсий и суспензий с учетом различных механизмов осаждения, где основой информацией является гидравлическое сопротивление рабочей зоны аппарата, которые могут применяться при модернизации аппаратов. На основе анализа гидродинамических особенностей движения капель и твердых частиц в тонкослойных отстойниках и режимов их работы представлены математические модели и расчетные выражения для эффективности сепарации смесей с учетом различных механизмов переноса. Рассмотрены различные механизмы переноса дисперсной фазы в жидкостях в проточных тонкослойных отстойниках, которые применяются в водоподготовке, в очистке сточных вод и других жидкостей в химической технологии и теплоэнергетике.

Ключевые слова: эмульсии; суспензии; тонкослойные отстойники; математические модели; эффективность разделения.

На тепловых станциях, а также предприятиях нефтехимии, нефтегазопереработки и нефтедобычи актуальны задачи разделения гетерогенных сред (эмульсий и суспензий) для обеспечения охраны окружающей среды, например при очистке сточных вод, а также в водоподготовке и очистке технологических жидкостей на промышленных установках. При очистке применяются различные аппаратное оформление, например – отстойники, фильтры, центрифуги, гидроциклоны и т.д. Выбор аппаратов зависит от вида и состава смесей, расхода потока на очистку, требованиям к эффективности разделения и энергозатратам.

Применяются различные методы разделения гетерогенных сред, и в частности водонефтяных эмульсии [1-3], некоторые из которых характеризуются не достаточной эффективностью и повышенными энергозатратами. Разрабатываются аппараты, которые устраняют эти недостатки [4], например, флотация с микропузырьками [5], коалесторы с вставками из пористого материала или с плоскими перегородками [6], аппараты с параллельными пластиковыми пластинами с узкими каналами [7], применяется мембранное разделение [8], используются адсорбционные материалы из аналога гидрофобных губок [9,10], применяются нановолоконные [11-13], есть аппараты с ультразвуком [14].

Разработаны гидрофильные и олеофобные мембраны для очистки нефтесодержащих сточных вод [15]. Однако широкого применения они не получили из-за негативного воздействия на окружающую среду и высокой стоимости. Пористая пеномедь (CF) с супергидрофобными или супергидрофильными свойствами применяется для разделения эмульсий масло-вода и вода в масле. Такая система имеет высокую эффективность разделения и производительность (до $185 \cdot 10^3$ л/(м²час)) [16]. В работе [17] получен способ разделения нефти и воды с применением

гидрофобного древесного среза с эффективностью 98 %. Так как древесина является доступным и недорогим материалом этот метод имеет перспективы к применению. Сравнение двух типов коалесторов из высокопористого материала, а также из плоских перегородок в отстойнике выполнено в работе [18]. Показано, что их применение позволяет повысить эффективность и скорость разделения водонефтяных эмульсий. Исследование разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе выполнено в работе [19]. Установлены режимные и конструктивные характеристики, обеспечивающие высокую эффективность разделения. Применение обратного осмоса рассмотрено в работе [20].

Перспективным направлением остается применение проточных тонкослойных отстойников, эффективность разделения гетерогенных сред в которых в несколько раз выше, чем у обычных отстойников [21-23]. Одними из первых конструкций многополочных отстойников были предложены в 30-х годах прошлого столетия И.Ф. Добряковым, В.А. Радцигом, Т. Сомрот, М. Szataу и др. Установлено, что для эффективного разделения число Рейнольдса должно быть $Re < 500$, а число Фруда $Fr > 10^{-5}$. Это обеспечивается делением потока в отстойнике перегородками с расположением под различными углами. Перегородки делят весь поток на ряд элементарных потоков. Такие аппараты применяются для очистки углеводородных смесей, очистки природных и сточных вод, технологических жидкостей на установках химической технологии и в теплоэнергетике. Наиболее эффективными являются пластинчатые модули, однако применяются и трубчатые модули на установках с небольшой производительностью. Трубы в модулях (пакетах) выполняются диаметром от 12,5 до 100 мм и могут иметь различный профиль, в том числе и с закруткой потока.

Выбор математического описания разделения гетерогенной смеси зависит от определяющих механизмов явлений переноса дисперсной фазы, которые зависят от гидродинамического режима и конструкции аппарата.

Целью данной работы является: на основе анализа гидродинамических особенностей движения капель и твердых частиц в тонкослойных отстойниках и режимов их работы представление математических моделей и расчетных выражений для эффективности сепарации смесей с учетом различных механизмов переноса.

Материалы и методы (Materials and methods)

Эффективность разделения смесей. Эффективность сепарации гетерогенной смеси может записываться в общем виде по концентрациям дисперсной фазы или по фракциям по размеру частиц (капель). В общем виде эффективность разделения

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

где C_H , C_K – концентрация на входе (начальная) и на выходе аппарата (массовая и объемная).

Очевидно, что разделительная эффективность аппарата зависит от многих факторов и в первую очередь от расхода смеси и полидисперсности капель, их плотности и формы. При ламинарном режиме течения гетерогенной смеси основным механизмом осаждения капель является гравитационный и расчет аппарата в основном связан со скоростью осаждения (или всплытия) капель. Большинство отстойников работают при ламинарном режиме.

При турбулентном режиме начинает проявляться поток массы частиц к стенке за счет турбулентной диффузии, а в закрученном потоке смеси – за счет центробежного механизма. Механизмы гравитационного, турбулентного и центробежного осаждения невязимосвязаны и общую эффективность сепарации можно записать по известному правилу

$$\eta = 1 - (1 - \eta_L)(1 - \eta_T)(1 - \eta_C), \quad (2)$$

где нижний индексы означают – ламинарный, турбулентной и центробежный.

В аппаратах разделения смесей как правило преобладает один из механизмов осаждения частиц, однако необходимо делать оценку скорости явлений переноса.

Гидродинамика капель. Фундаментальные исследования движения дисперсных сред представлены в монографиях [24, 25] и многих других работах.

На частицу (каплю) при спутанном движении в канале действует ряд сил, связанных с гидродинамическими особенностями несущего потока, а также с размером, формой и плотностью капли. Форма капли зависит от числа Вебера $We = \rho_c u_k^2 d_k / \sigma$, где ρ_c – плотность сплошной среды, кг/м³; u_k – скорость движения капли, м/с; d_k – диаметр капли, м; σ – поверхностное натяжение, Па/м.

Известно, что при $We < 0,1$ форма капли близка к сферической и далее при постоянном числе Рейнольдса с увеличением числа Вебера (до 0,5–0,8) форма капли принимает вид сфероида, который сплюснен в направлении движения. С дальнейшим повышением We форма капли деформируется в лобовой зоне и форма становится близкой к эллипсоидальной, а затем с появлением лунки в лобовой части капля приобретает вид чечевицепоподобной. При числе $We > 0,8$ общий коэффициент гидродинамического сопротивления ξ начинает увеличиваться из-за деформации капли, а также ее колебания. Примерно при $Re \approx 200$ и $We \approx 4$ движение капель становится неустойчивое и капли осциллируют.

При $Re > (150 - 200)$ коэффициент гидравлического сопротивления капли значительно отличается от ξ для твердой сферы. Некоторое снижение ξ капли можно объяснить подвижной межфазной поверхностью для сферической капли, а дальнейшее повышение – деформацией формы. В отличии от твердых частиц расчетные зависимости для ξ связаны с критериями Re , We и $\mu^* = \mu_d / \mu_c$, где μ_d , μ_c – коэффициенты динамической вязкости дисперсной и сплошной фаз. Кроме при $We > (10 - 15)$ происходит дробление капель на более мелкие. Отсюда следует вывод о том, что даже при ламинарном режиме течения сплошной среды определение скорости осаждения (или всплытия) капель в расчетах отстойников является не такой простой задачей, тем более при стесненном движении ансамбля полидисперсных капель или твердых частиц.

Известно, что при движении однофазного потока в канале турбулентность начинается развиваться при $Re = u_{cp} d_э / \nu_{ж} > 2300$, где u_{cp} – средняя скорость среды, м/с; $d_э$ – эквивалентный диаметр канала, м²; $\nu_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости, м²/с, то в двухфазных средах смена режима не такая однозначная.

В канале с двухфазными потоками смена режима может происходить $Re < 2300$ из-за изменения формы и поверхности канала за счет осевшей дисперсной фазы, а также вихреобразования за счет движения капель и частиц. При достижении некоторого критического значения числа $Re_{к.кр}$ для капли, где $Re_{к} = u_{к} d_{к} / \nu_{ж}$, происходит отрыв внешнего потока с образованием в кормовой части вихрей (вихревого следа). Значение $Re_{к.кр}$ находится в интервале от 100 до 300 и зависит как от размера и формы капли, так и от отношения $\mu^* = \mu_d / \mu_c$. Так, например, уже при $\mu^* \approx 3$ отрыв потока и вихревой след за каплей появляется при $Re_{к} \approx 100$. Длина вихревого следа (дорожка Кармана) может достигать нескольких диаметров капли и при стесненном движении (концентрации дисперсной фазы примерно больше 3-5%) капая попадает в вихревой след впереди идущей капли. Кроме этого переход от ламинарного режима в отстойнике может произойти при повышении его производительности. Следовательно, в ряде случаев надо учитывать турбулентность в расчетах динамических отстойников.

Уравнения переноса частиц. Математическому моделированию и экспериментальным исследованиям гидродинамики взвешенных частиц в турбулентных двухфазных средах

посвящены многочисленные труды Р.И. Нигматулина, А.Н. Колмогорова, Г.М. Островского, В.Г. Левича, Л.Н. Зайчика, С.И. Кучанова, Б.И. Броунштейна, А.М. Розена и многих других видных ученых. Так, например, В.Г. Левичем и С.И. Кучановым установлено, что определяющим механизмом является турбулентной перенос частиц. Это объясняется дополнительной величиной скорости диссипации энергии из-за присутствия взвешенных частиц в турбулентном потоке. В теории и практике расчета гетерогенных сред применяется подход, когда явления переноса тонкодисперсной фазы (размер частиц < 200мкм) моделируются по аналогии с молекулярной диффузией, что дает возможность применять теорию массопередачи из массообменных процессов.

Допущения к математической модели: диаметр частиц небольшой относительно несущих вихрей, полидисперсность учитывается пофракционно; стесненность частиц слабо влияет на осаждение; достигнув стенки частицы прилегают к поверхности без срыва и уноса, далее сползают и удаляются из аппарата.

Уравнения турбулентного массопереноса частиц в сплошной фазе для плоскопараллельного канала имеют известную форму

$$u(y) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (3)$$

а для цилиндрического канала:

$$u(r) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_d \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где D_d – коэффициент турбулентной диффузии частиц, м²/с; $u(y)$, $u(r)$ – скорость течения среды, как функция поперечной координаты, м/с; C – концентрация частиц, кг/м³; r – радиальная координата до оси трубы, м; z – продольная координата по направлению движения жидкости, м; y – поперечная координата к стенке канала, м.

Граничные условия задаются на входе в канал, на стенке, оси симметрии и на выходе для дифференциальных уравнений (3), (4).

На входе при $z = 0$; $C = C_n$; $u(y), u(r) = u_n$.

На стенке при $y = 0$ или $r = R$; $C = C_{гр} = 0$; $u(y) = u(r) = 0$; $j = \beta_d (C - C_{гр})$ – поток массы частиц к стенке, кг/м²с; R – радиус канала, м; β_d – коэффициент скорости турбулентного переноса частиц к стенке, м/с.

Значение $C_{гр}$ принимается равное нулю, т.к. частица, достигнув и осев на стенку канала, покидает поток сплошной фазы.

На оси симметрии при $y = R$ или $r = 0$, $\partial C / \partial y = \partial C / \partial r = 0$.

На выходе при $z = H$; $\partial C / \partial z = 0$; H – длина канала, м;

Коэффициент скорости турбулентного осаждения частиц характеризует интенсивность переноса и осаждения частиц из турбулентного потока жидкости на стенках канала. Необходимое условие $\beta_d \gg u_{ос}$; где $u_{ос}$ – скорость гравитационного осаждения частиц, м/с.

Уравнение (3) для прямоугольного канала и уравнение (4) для трубы можно решить численно при известных значениях коэффициентов турбулентной диффузии частиц $D_d(y)$ и $D_d(r)$, а так же источника массы оседающих частиц, связанного с плотностью потока частиц j и удельной поверхностью осаждения dF . Однако, при решении конкретных производственных задач представляется более целесообразным для расчета эффективности турбулентного осаждения тонкодисперсных частиц использовать апробированные модели структуры потоков, которые широко применяются в процессах и аппаратах химической технологии. Тогда выражения (3), (4), после ряда известных допущений, могут быть записаны в форме диффузионных одно- или

двухпараметрических моделей структуры потоков с параметрами идентификации в виде коэффициентов обратного (продольного) и поперечного перемешивания.

Формула (5) представляет собой однопараметрическую диффузионную модель с объемным источником массы осаждающихся частиц

$$u_{\text{ж}} \frac{dC}{dz} = D_{\text{п}} \frac{d^2C}{dz^2} + \beta_d a_v C, \quad (5)$$

где $D_{\text{п}}$ – коэффициент обратного (продольного) перемешивания сплошной фазы, $\text{м}^2/\text{с}$; $u_{\text{ж}}$ – средняя скорость сплошной фазы в канале, $\text{м}/\text{с}$; a_v – удельная поверхность канала, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Так, для труб $a_v = \pi dH / (\pi d^2 H / 4) = 4 / d$, где d – внутренний диаметр труб, м .

Если модифицированное число Пекле $Pe_{\text{п}} = u_{\text{ж}} H / D_{\text{п}} > 20$, то обратное перемешивание потока незначительно и тогда уравнение (5) будет иметь вид модели идеального вытеснения:

$$u_{\text{ж}} \frac{dC}{dz} = \beta_d a_v C, \quad (6)$$

решение которого для эффективности разделения (1) имеет вид

$$\eta = 1 - \left(\exp - \frac{\beta_d F}{V_{\text{ж}}} \right), \quad (7)$$

где F – площадь поверхности стенок канала, м^2 ; $V_{\text{ж}}$ – объемный расход сплошной среды, $\text{м}^3/\text{с}$.

Модель переноса и осаждения частиц. По мере приближения частиц (капель) к поверхности стенки канала турбулентная диффузия затухает и в очень тонком подслое практически равна нулю. Как показывают оценки толщина такого подслоя очень мала ($\delta_1 \sim (10^{-6} - 10^{-7})$, м), а размер капель (частиц) на порядок больше. Тогда можно предположить, что в тонком подслое происходит инерционное движение капель к стенке, аналогично как принимается в миграционной турбулентно-инерционной модели в газах [26].

В форме закона Фика-Буссинеска плотность потока капель к стенке

$$j = D_{\text{тд}}(y) \frac{dC}{dy}, \quad (8)$$

где коэффициент турбулентной диффузии частиц принят в виде [26]

$$D_{\text{тд}}(y) = \frac{D_{\text{т}}(y)}{1 + \omega_E \tau_p}, \quad (9)$$

где $D_{\text{т}}(y)$ – коэффициент турбулентной диффузии в потоке, который зачастую равен $D_{\text{т}}(y) \approx \nu_{\text{т}}(y)$, где $\nu_{\text{т}}(y)$ – коэффициент турбулентной вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $\omega_E = u_* / (0,1R_g)$ – частота энергоемких пульсаций, с^{-1} ; u_* – динамическая скорость (скорость касательного

напряжения на стенке), м/с; R_3 – эквивалентный радиус канала, м; τ_p – время релаксации частиц, с

$$\tau_p = \frac{d_k^2 |\Delta\rho|}{18\mu_c}, \quad (10)$$

где $\Delta\rho = \rho_c - \rho_k$ – разность плотностей сплошной среды и капли, кг/м³.

Выражение для сопротивления турбулентного переноса частиц в пристенном слое от δ до δ_1 , т.е. в области затухания турбулентных пульсаций (несущих вихрей с каплями)

$$\frac{1}{\beta_d} = \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{dy}{D_{Td}(y)}, \quad (11)$$

где β_d – средний коэффициент скорости переноса капель (частиц), м/с (аналог коэффициента массоотдачи); δ – толщина пристенного слоя, м; δ_1 – толщина вязкого подслоя. Выражение (11) можно проинтегрировать при известной функции $D_{Td}(y)$.

Примем известную трехслойную модель турбулентного пограничного слоя

$$\frac{v_T(y)}{v_{ж}} = 0,01\chi^4(y^+)^4, \quad y^+ < 5; \quad (12)$$

$$\frac{v_T(y)}{v_{ж}} = 0,02y^+ - 0,959, \quad 5 \leq y^+ \leq 30; \quad (13)$$

$$\frac{v_T(y)}{v_{ж}} = 0,4y^+ - 1, \quad \text{при } y^+ > 30, \quad (14)$$

где $y^+ = yu_* / v_{ж}$ – безразмерная координата; $\chi = 0,4$ – контакта турбулентности. После интегрирования (11) с функциями (12)-(14) с учетом (9) получено

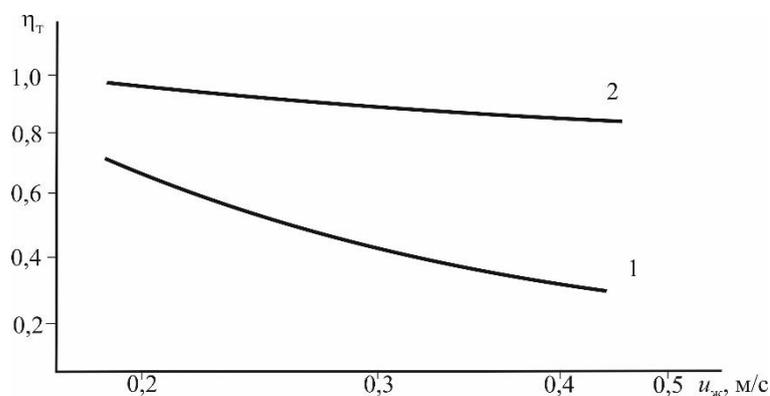
$$\beta_d = \frac{u_*}{(1 + \omega_E \tau_p) \left[R_1 \ln(R_2 / R_1) + \frac{1}{\chi} \ln(R_\delta / R_2) \right]}, \quad (15)$$

где $R_1 = u_* \delta_1 / v_{ж}$; $R_\delta = u_* \delta / v_{ж}$; $R_2 = u_* \delta / v_{ж}$ – безразмерные толщины пограничного слоя; $R_1 = 5$; $R_2 = 30$, а значение R_δ зависит от гидродинамики потока и приближенно $R_\delta = 0,25u_* R_3 / v_{ж}$. Следует отметить, что при наличии на поверхности канала осевших капель, которые создают шероховатость, значения R_1 и R_2 принимают несколько другие значения, меньше чем на гладкой поверхности [23,27,28].

Значение динамической скорости в канале с шероховатой стенкой вычисляется на основе выражения баланса сил $u_* = u_{ж} \sqrt{\xi_{ш} / 8}$, где $\xi_{ш}$ – коэффициент гидравлического сопротивления канала [23, 27, 28].

Результаты и обсуждение.

На рис. 1 представлены зависимости турбулентной сепарации частиц ($\Delta\rho = 10^3, \text{ кг/м}^3$) от средней скорости потока в цилиндрическом канале. Из расчетов следует, что эффективность сепарации частиц при $d_c = 10^{-3}, \text{ м}$ (1 мкм) ниже в 1,5-2,5 раза, чем для частиц с размером на порядок меньше ($d_c = 10^{-4}, \text{ м}$) при одинаковой плотности. Это объясняется индексом инерционности частиц $\omega_E \tau_p$, который входит в выражение для β_d (15). Чем больше размер частиц и соответственно $\omega_E \tau_p$, тем частица меньше увлекается турбулентными пульсациями среды (выражение для $D_{ТЧ}$ (9)) и скорость турбулентного переноса снижается. Однако на крупные частицы начинает действовать сила тяжести, поэтому общую эффективность сепарации однозначно оценить затруднительно. Следует учитывать, что в турбулентном режиме скорость гравитационного осаждения снижается из-за турбулентного перешивания потока. Частицы, которые не увлекаются турбулентными пульсациями ориентировочно должны иметь диаметр $d_c > 13,4 \cdot (R \mu_{ж} / (\Delta\rho |u_*))^{0,5}$ [27], что для рассмотренного примера $d_c > 5 \cdot 10^{-3}, \text{ (5мм)}$. Математические модели для расчета эффективности сепарации при ламинарном режиме даны в работах [29,30].

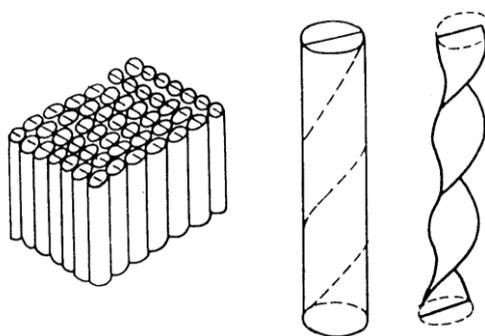


Источник: составлено автором

Рисунок 1. Зависимость эффективности турбулентной сепарации при осесимметричном движении суспензии в канале от средней скорости:

1 – диаметр частиц $d_c = 10^{-3}, \text{ м}$; 2 – $d_c = 10^{-4}, \text{ м}$; $d = 0,025, \text{ м}$; $H = 1,0 \text{ м}$; $\Delta\rho = 10^3, \text{ кг/м}^3$.

Центробежная сепарация. В канале для разделения эмульсии может устанавливаться закручивающее устройство или сами стенки канала выполняются профилированные по винтовой линии (рис. 2) [31, 32], что повышает эффективность процесса при $\rho_k > \rho_c$.



Источник: составлено авторами источников [31,32]

Рисунок 2. Трубчатый блок с элементами закрутки потока

В закрученном потоке на капли и частицы имеет действие центробежная сила $F_{ц} = m_k V_{\omega}^2 / r$, где m_k – масса капли, кг; V_{ω} – скорость вращения эмульсии относительно оси, м/с; r – радиус вращения, м. Скорость центробежного осаждения капель

$$u_{ц} = \tau_p \frac{V_{\omega}^2}{r}. \quad (16)$$

По формуле (17) определяется эффективность центробежного разделения эмульсии при идеальном вытеснении потока

$$\eta_{ц} = 1 - \exp\left(-\frac{u_{ц} F}{V_{ж}}\right). \quad (17)$$

Среднюю скорость вращения эмульсии (суспензии) относительно неподвижной оси определяется по $V_{\omega} = u_{ж} / \cos\theta - u_{ж}$, где θ – угол закрутки потока. Очевидно, что при $\cos\theta = 1$ имеем $V_{\omega} = 0$, т.е. осесимметричное движение без закрутки.

На рис. 3 даны зависимости центробежной эффективности сепарации частиц от их диаметра при различной средней скорости суспензии с углом закрутки $\theta = 45^\circ$.

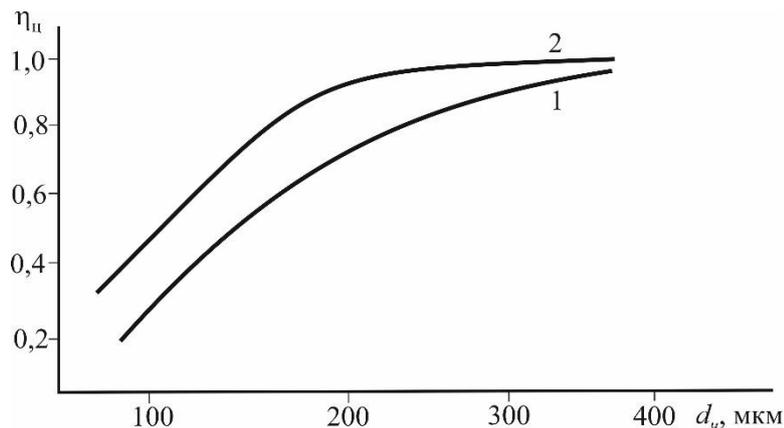


Рисунок 3. Зависимость эффективности центробежной сепарации твердых частиц ($\Delta\rho = 10^3$, кг/м³) от их размера. 1– средняя скорость смеси $u_{ж} = 0,2$ м/с; 2 – $u_{ж} = 0,4$ м/с; $d = 0,025$ м; $H = 1,0$ м; угол закрутки $\theta = 45^\circ$.

Очевидно, что при как при увеличении диаметра частиц, так и скорости потока повышается центробежная сила и эффективность увеличивается. При скорости $u_{ж} = 0,4$ м/с и более для частиц $d_{ч} > 300$ мкм эффективность сепарации составляет $\eta \approx 0,99$.

Выводы (Conclusions)

В статье рассмотрены различные механизмы переноса дисперсной фазы в жидкостях в проточных тонкослойных отстойниках, которые применяются в водоподготовке, в очистке сточных вод и других жидкостей в химической технологии и теплоэнергетике. Получены выражения для определения эффективности очистки, которые могут применяться при проектировании аппаратов или их модернизации. Так, например, авторами статьи на основе применения математической модели выполнены расчеты и разработаны научно-технические решения по модернизации действующих проточных отстойников на установках газоразделения в производстве этилена. Отстойники оснащены тонкослойными модулями и эффективность очистки циркуляционной воды от дисперсной фазы значительно повысилась.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Grossmann I.E., Harjunkoski I. Process Systems Engineering: Academic and Industrial Perspectives // *Comput. Chem. Eng.* 2019. Vol. 126, Iss. 12. Pp. 474–484.
2. Лаптев А.Б., Ибрагимов Н.Г., Хафизов А.Р. Осложнения в нефтедобыче. Уфа: ООО Изд-во науч.-техн. лит-ры «Монография», 2003. 302 с.
3. Тимербаев А.С., Таранова Л.В. Численное моделирование процесса разделения водонефтяных эмульсий в центробежном сепараторе // *Фундаментальные исследования.* 2014. № 9. С. 547–551.
4. Захаров М.К., Писаренко Ю.А., Сычева О.И. Сравнение способов энергосбережения при ректификации жидких смесей // *Известия вузов. Химия и химическая технология.* 2021. Т. 64, № 1. С. 86–92.
5. Xiaobing Li, Hongxiang Xu, Jiongtian Liu, Jian Zhangc, Jig Li, Zhaolong Gui. Cyclonic state micro-bubble flotation column in oil-in-water emulsion separation // *Sep. and Purif. Tech.* 2016. Vol. 165. Pp. 101-106.
6. Dmitriev A.V., Zinnurov V.E. Removal of moisture from contaminated transformer oil in rectangular separators. *E3S Web of Conferences.* 2019. Vol. 110(2). Pp. 1-7.
7. Wang Shuo, Qin Wei, Dai Youyuan. Separation of Oil Phase from Dilute Oil/Water Emulsion in Confined Space Apparatus // *Chin. Jour. of Chem. Engineering.* 2012. Vol. 20(2). Pp. 239-245.
8. Gibum Kwon, Arun. K. Kota, Yongxin Li, Ameya Sohani, Joseph M. Mabry, Anish Tuteja. On-Demand Separation of Oil-Water Mixtures // *Adv. maters.* 2012. Vol. 24, Iss. 27. Pp. 3666-3671.
2. 9. 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. Vol. 9, Iss. 4. Pp. 3791–3799.
1. 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 // *Jour. of membrane scien.* 2018. Vol. 565. Pp. 303-310.
3. 11. 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. Polymer Mat.* 2021. Vol. 3 (6). Pp. 3093-3102.
4. Xianfeng Wang, Jianyong Yu, Gang Sun, Bin Ding. Electrospun nanofibrous materials: a versatile medium for effective oil/water separation // *Materials today.* 2016. Vol. 19, Iss. 7. Pp. 403-414.
5. Jin Ge, Yin-Dong Ye, Hong-Bin Yao, Xi Zhu, Xu Wang, Liang Wu, Jin-Long Wang, Hang Ding, Ni Yong, Ling-Hui He, Dr. Shu-Hong Yu. Pumping through Porous Hydrophobic/Oleophilic Materials: An Alternative Technology for Oil Spill Remediation // *Angewandte Chem. Internat. Edit.* 2014. Vol. 53, Iss. 14, Pp. 3612-3616.
6. Xianzhen Xu, Dan Cao, Jin Liu, Jun Gao, Xiaoyi Wang. Research on ultrasound-assisted demulsification/dehydration for crude oil // *Ultrasonic Sonochem.* 2019. Vol. 57. P. 185-192.
7. Bin Xiang, Guogui Shi, Peng Mu, Jian Li. Eco-friendly WBF/PAN nanofiber composite membrane for efficient separation various surfactant-stabilized oil-in-water emulsions // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2022. Vol. 645. Pp. 128-179.
8. Lei Qiu, Yihan Sunb and Zhiguang Guo. Designing novel superwetting surfaces for high-efficiency oil–water separation: design principles, opportunities, trends and challenges // *Journal of material chemistry A.* 2020. Vol. 8, Iss. 33. Pp. 16831-16853.
9. Xiangge Bai, Yongqian Shen, Haifeng Tian, Yaoxi Yang, Hua Feng, Jian Li. Facile fabrication of superhydrophobic wood slice for effective water-in-oil emulsion separation // *Separation and Purification Technology.* 2019. Vol. 210. Pp. 402-408.
10. Vadim Zinurov, Ilnar Sharipov, Oksana Dmitrieva and Ilnur Madyshev. The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation // *E3S Web of Conferences.* 2020. Vol. 157. Pp. 1-7.

11. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Данг С.В. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3 (39). С. 65-71.
12. Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р. Исследование процесса обессоливания концентрата установок обратного осмоса отходом энергетики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 2. С. 186-195.
13. Демура М.В. Проектирование тонкослойных отстойников. Киев: Будивельник.1981. 78 с.
14. Покровский В.Н., Аракчеев Е.П. Очистка сточных вод тепловых электростанций. М: Энергия, 1980. 256 с.
15. Лаптев А.Г., Башаров М.М. Эффективность тепломассообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса. Казань: Центр инновационных технологий, 2016. 344 с.
16. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука,1987. 464с.
17. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. 3-е изд.Москва-Ижевск: изд-во "ИКИ", 2016. 686 с.
18. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. Москва: Наука, 1980. 176 с.
19. А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, Е.А. Лаптева, Т.М. Фарахов. Модели и эффективность процессов межфазного переноса: часть 1. Гидромеханические процессы./ под ред Лаптева А.Г. Казань: Центр инновационных технологий, 2017. 392 с.
20. 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.
21. Laptev A.G., Lapteva E.A., Iskhakova R. Ya. The efficiency determination of the combined emulsion separator// ChemChemTech. 2022. V. 65. N 5. Pp. 112-120.
22. Лаптев А.Г., Исхакова Р.Я. Определение поверхности осаждения дисперсной фазы в тонкослойном отстойнике // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. Вып. 2. С.86-92.
23. Адельшин А.Б., Адельшина А.А., Гришин Б.М., Бикунова М.В. Очистка нефтепромысловых сточных вод с использованием центробежных аппаратов// Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 2. С.29-35.
24. Ксенофонтова Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А. и др. Инженерное оформление процессов очистки сточных вод с использованием флотокомбайнов серии КБС// Экология и промышленность России. 2022. Т.11, № 26. С.4-7.

MATHEMATICAL MODELS OF THE HETEROGENEOUS MEDIA SEPARATION IN THIN-LAYER SEDIMENTATION TANKS WITH DIFFERENT WORK MODE

Laptev A.G., Basharov M.M., Iskhakova R.Ya.

The relevance of this study lies in minimizing the anthropogenic impact of wastewaters on the environment by developing and applying new mathematical models in order to optimize the design processes of wastewater treatment plants. Expressions for the emulsions and suspensions separation efficiency determination with various sedimentation mechanisms were obtained. The basis of information is the hydraulic resistance of the working area of the apparatus which can be used in the design of apparatuses or their modernization. The mathematical model and calculation expressions that can be used in the calculations of thin-layer sedimentation tanks with laminar, turbulent regime flows of heterogeneous medias, as well as taking into account flow swirling were developed.

Keywords: emulsions; suspensions; thin-layer sedimentation tanks; mathematical models;

separation efficiency.

Сведения об авторах:

Анатолий Григорьевич Лаптев:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭ) ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ)

e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Башаров Марат Миннахматович

Доктор технических наук, директор производства ООО «Балтийская химическая компания»

e-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Исхакова Регина Яновна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» (ИЭ), ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ)

e-mail: imreginaiskh@gmail.com

Учредитель журнала: Мельников Игорь Олегович, кандидат химических наук

Издатель: Общество с ограниченной ответственностью
"Издательство "Манускрипт" (ОГРН 1226100004679)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), Свидетельство серия серия ПИ № ФС 77 – 31640 10.04.2008, **Адрес:** 127473, Москва г., 3-й Самотечный пер., д. 23, кв. 48
Тел. +7 951 528 22 82 **E-mail:** VAK-info@yandex.ru

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Манускрипт»

Подписано в печать 25.07.2023. Выход в свет 03.08. 2023г.

Тираж 150 экз. Заказ № 13–23/ РС–23. Цена свободная