

Расчет процесса фракционирования порошка в роторе трубчатой центрифуги

| | | | |
|------------------------|--------------|--|---|
| Вера А. Грибкова | ¹ | vera_gribkova@list.ru |  0000-0002-5079-8132 |
| Евгений В. Семенов | ¹ | sem-post@mail.ru |  0000-0001-6203-1783 |
| Анатолий А. Славянский | ¹ | anatoliy4455@ya.ru |  0000-0002-0262-8841 |
| Дарья П. Митрошина | ¹ | d_mitr96@mail.ru |  0000-0002-8724-3368 |
| Сергей Т. Антипов | ² | ast@vsuet.ru |  0000-0003-4299-1538 |

¹ Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ), ул. Земляной Вал, д. 73, г. Москва, 109004, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Предлагаемая вниманию читателя центрифуга применяется в самых разнообразных отраслях промышленности. С технической точки зрения её отличает удлиненный, сплошной, движущийся с высокой частотой вращения ротор, откуда следует высокое значение фактора разделения. Данная машина с трубчатым ротором часто используется при обработке жидкостных обладающих уникальными свойствами сред, с целью их разделения (с частицами размером 0,5-5 мкм, объемной концентрацией твердого не более 2 %), а также в тех случаях, когда эмульсии разделяются с трудом; в пищевых производствах – при обработке фруктовых соков, бактериальных бульонов. Важным сегментом научно-технической области, когда прибегают к использованию трубчатой центрифуги на практике, является фракционирование на их основе взвесей по величине частиц твердой фазы, а также при дисперсионном анализе высокодисперсных и коллоидных систем. В тоже время следует подчеркнуть, что, хотя с позиций оптимизации процесса центрифугирования, формирования слоя осадка на стенке ротора, исследуемая здесь проблема и поднималась в работах таких учёных, как Соколов В.И., Беккер Е., Александров О.Е. и др., проработана все еще недостаточно. В данной статье на базе научного положения о заданном движении частицы с так называемым критическим диаметром в тонкослойном жидкостном потоке, предлагается методика поэтапного фракционирования полидисперсного взвешенного в жидкости порошка в роторе трубчатой центрифуги, с целью выделить из него частицы данного размера. На пробном измельченном материале проводится численное моделирование процесса фракционирования, что может быть использовано в практических условиях.

Ключевые слова: центрифугирование, разделение, трубчатая центрифуга, суспензия, фракционирование

Calculation of the powder fractionation process in a tubular centrifuge rotor

| | | | |
|-----------------------|--------------|--|---|
| Vera A. Gribkova | ¹ | vera_gribkova@list.ru |  0000-0002-5079-8132 |
| Evgeny V. Semenov | ¹ | sem-post@mail.ru |  0000-0001-6203-1783 |
| Anatoly A. Slavyansky | ¹ | anatoliy4455@ya.ru |  0000-0002-0262-8841 |
| Daria P. Mitroshina | ¹ | d_mitr96@mail.ru |  0000-0002-8724-3368 |
| Sergey T. Antipov | ² | ast@vsuet.ru |  0000-0003-4299-1538 |

¹ Moscow State University of Technology and Management. K.G. Razumovsky (the First Cossack University), St. Zemlyanoy Val, 73, 109004, Moscow, Russia

² Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The centrifuge offered to the reader's attention is used in a wide variety of industries. From a technical point of view, it is characterized by an elongated, solid, high-speed rotor that results in a high separation factor. This tubular rotor machine is often used in the processing of liquid media with unique properties, for the purpose of their separation (with particles of 0.5-5 μm in size, with a volume concentration of solids of no more than 2%), as well as in cases where emulsions are difficult to separate; In food production – in the processing of fruit juices, bacterial broths. An important segment of the scientific and technical field, when the use of tubular centrifuges in practice, is the fractionation of suspended solids based on them, as well as in the dispersion analysis of highly dispersed and colloidal systems. At the same time, it should be emphasized that, although from the standpoint of optimizing the centrifugation process, the formation of a layer of sediment on the rotor wall, the problem studied here was raised in the works of such scientists as Sokolov V.I., Becker E., Aleksandrov O.E. and others, it has not yet been sufficiently worked out. In this article, on the basis of the scientific position on the given motion of a particle with the so-called critical diameter in a thin-layer liquid flow, a method of step-by-step fractionation of polydisperse powder suspended in liquid in the rotor of a tubular centrifuge is proposed in order to isolate particles of a given size from it. Numerical simulation of the fractionation process is carried out on the test crushed material, which can be used in practical conditions.

Keywords: centrifugation, separation, tubular centrifuge, suspension, fractionation.

Для цитирования

Грибкова В.А., Семенов Е.В., Славянский А.А., Митрошина Д.П., Антипов С.Т. Расчет процесса фракционирования порошка в роторе трубчатой центрифуги // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 2. С. 25–32. doi:10.20914/2310-1202-2024-2-25-32

For citation

Gribkova V.A., Semenov E.V., Slavyansky A.A., Mitroshina D.P., Antipov S.T. Calculation of the powder fractionation process in a tubular centrifuge rotor. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 2. pp. 25–32. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-2-25-32

Введение

Центрифуги получили широкое распространение в процессах очистки масел, а также при создании вакцин и сывороток в фармацевтической промышленности, где используют центрифуги марок ОТР-102К-01 и ОТР-151К-01 – машины периодического действия с осветляющим трубчатым ротором [13–20]. С целью осветления суспензий с мелкодисперсной твердой фазой концентрацией не более 2%, и отношением плотностей твердой и жидкой фаз в диапазоне не менее 1,1, предназначены центрифуги марки РТР – 102К – 01.

Помимо этого, трубчатые центрифуги используют и для дисперсионного анализа высокодисперсных систем, а также в случаях, когда необходимо применять машины с малыми рабочими поверхностями. В частности, центрифуги марки ОТР, РТР применяют для осветления суспензий с тонкодисперсной твердой фазой с размером частиц в диапазоне 0,5 – 5 мкм, объемная концентрация их в жидкой фазе не более 1%.

Диаметры роторов промышленных центрифуг – 80 – 150 мм, лабораторных – 40 – 50 мм; производительность – 0,2 – 2 м³/ч. Данный тип машин используют в пищевой, химической, медицинской и других отраслях промышленности.

Следует отметить, что вследствие сравнительной простоты изготовления и надежности в эксплуатации за истекшие 30 лет технические параметры трубчатых центрифуг (диаметр и длина ротора, фактор разделения) практически не менялись.

В теоретическом плане проблема количественного анализа кинетики процесса разделения смесей, применительно к газовой центрифуге, исследовалась в работах [6–12], к жидкостной центрифуге – в работах [1–5]. Несмотря на это, такие вопросы как эволюция дисперсности взвеси при обработке ее во внутриворотном потоке, формировании слоя осадка на стенке ротора, оптимизации процесса центрифугирования и другое проработаны все еще недостаточно.

В связи с этим данная проблема нуждается в дальнейшем углубленном изучении, поскольку в практическом отношении необходимо располагать корректным расчетным аппаратом прогнозирования протекания данного процесса.

Ниже, с новых позиций, предлагается аналитический аппарат в известной степени свободный от отмеченных недостатков и численное моделирование процесса разделения суспензии с целью фракционирования затравочного порошка в рабочем объеме центробежной машины непрерывного действия, относящейся по типу к отстойной центрифуге.

В дальнейшем при анализе процесса седиментации взвеси в роторе центрифуги предполагают, что обрабатываемая суспензия представляет собой слабо концентрированную жидкостную смесь, включающую частицы малого размера и примерно сферической формы. Считают, что ротор центрифуги находится в равномерном движении с угловой скоростью ω , поток ограничен областью $r_0 \leq r \leq R$ (где r_0 и R , соответственно, радиус свободной поверхности жидкости и радиус ротора), $0 \leq z \leq L$ (рисунок 1).

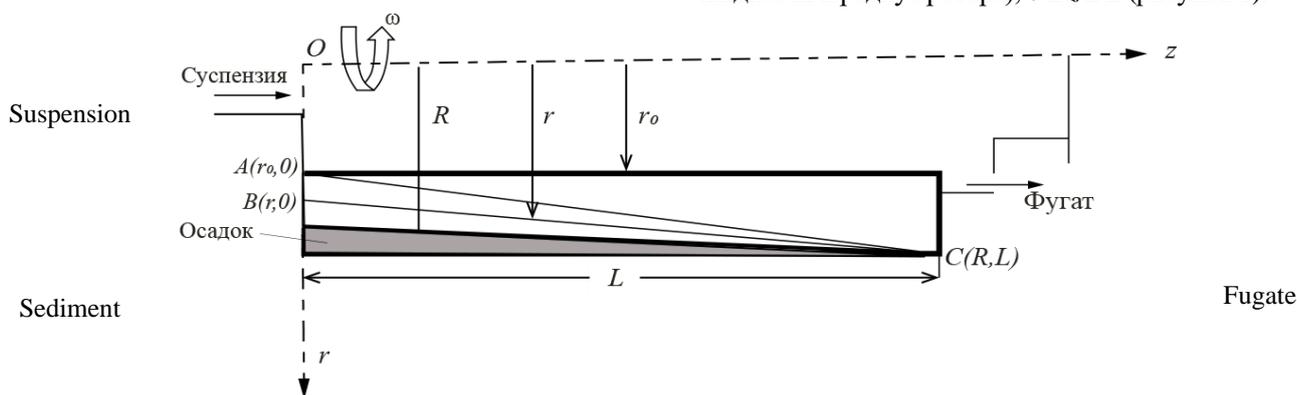


Рисунок 1. Схема ротора трубчатой центрифуги непрерывного действия (в меридиональном сечении)
Figure 1. Diagram of the rotor of a continuous tubular centrifuge (in the meridional section)

По данным ряда работ установлено, что значение числа Рейнольдса во внутриворотном потоке центрифуги в таких случаях невелико. Поэтому режим течения в роторах этих машин следует считать ламинарным. Это создает предпосылки для количественного анализа в аналитической форме кинетики взвеси в потоке, с использованием известной, справедливой для тонкодисперсного порошка, зависимости [2]

$$v_0 = \frac{\omega^2 r \Delta \delta^2}{18\mu}, \quad (1)$$

где $\Delta = \rho_t - \rho_j$, ρ_t , ρ_j – соответственно, плотность твердого и жидкости, кг/м³; и для определенности $\rho_t > \rho_j$, $\Delta > 0$; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; δ – диаметр частицы, м; $v_0 = v_r$ – характерная скорость частицы (м/с).

В свою очередь, осевая составляющая скорости потока выбирается по зависимости [2]

$$v_z = \frac{V}{\pi\beta} \left[\frac{R^2 - r^2}{2} + r_0^2 \ln \left(\frac{r_0}{R} \right) \right], \quad (2)$$

где

$$\beta = \frac{R^4}{4} + \frac{3r_0^4}{4} - R^2 r_0^2 - r_0^4, \text{ м}^4; \quad (3)$$

V – расход жидкости, м³/с; $V = Q/3600$, Q – производительность центрифуги, м³/ч.

В таком случае, исходя из дифференциального уравнения траектории пробной частицы $dr/dz = v_r/v_z$, с учетом (1)–(3) приходят к соотношению

$$18\mu V \left[0,5 \left(\frac{R^2}{r} - r \right) + \ln \left(\frac{r}{R} \right) + r_0^2 \frac{1}{r} \right] dr = \pi\beta\omega^2 \Delta\delta^2 dz. \quad (4)$$

Для того чтобы получить зависимость между параметрами потока жидкости и пробной (гипотетической) частицей, перемещающейся по траектории BC (где $B(r, 0)$, $C(R, L)$), уравнение (4) интегрируют слева по r в пределах от r до R , справа по z – в пределах от 0 до L (рисунок 1).

В результате чего получают выражение для так называемого критического диаметра данной частицы

$$\delta(r, \omega, c_0) = \frac{1}{\omega} \sqrt{\gamma V(c_0) l(r)}, \quad (5)$$

где обозначено

$$\gamma = \frac{9\mu}{2\pi\beta L \Delta}, \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1};$$

$$l(r) r^2 - R^2 + 2R^2 \ln \left(\frac{R}{r} \right) - 2r_0^2 \ln^2 \left(\frac{R}{r} \right), \text{ м}^2;$$

β рассчитывают по (3).

Величина $\delta_k = \delta_k(r_0)$ – называемый глобальным критическим диаметром – т. е. диаметр частицы, перемещающейся по траектории AC (рисунок 1) (BC – траектория частицы текущим диаметром δ).

Пусть $F(\delta)$ – счётная функция распределения частиц, такая, что

$$F(\delta) = \frac{n(\delta < \delta')}{n_0}, \quad (6)$$

где n – количество частиц размером $\delta < \delta'$, n_0 – количество частиц в исходной суспензии, δ' вычисляется по (5).

В принятом допущении о невысоком значении концентрации твердой фазы в исходной суспензии, согласно результатам [2], коэффициент ε уноса рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{n}{n_0} = \frac{2}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R F(\delta(r)) r dr. \quad (7)$$

В свою очередь, коэффициент осветления – относительное число частиц в осадке – вычисляется по зависимости

$$\eta = \frac{2}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R \Phi(\delta(r)) r dr,$$

где $\Phi(\delta) = 1 - F(\delta)$, $\Phi(\delta)$ – так называемая характеристическая функция, $F(\delta)$ определяют согласно (7).

Причём, очевидно, что величины ε и η , по определению, связаны соотношением $\varepsilon + \eta = 1$.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась (условно) суспензия типа «жидкостная фаза + частицы» затравочного материала с полидисперсной твердой фазой затравки примерно сферической формы. Чтобы путём расчёта выделить из суспензии взвешенные в ней частицы заданного целевого диапазона твердую фазу подвергали процедуре фракционирования, используя для этой цели трубчатую центрифугу.

Расчеты проводили (в дополнение к данным расчетного примера к формуле (2)) на базе параметров: радиус свободной поверхности жидкости $r_0 = 0,015$ м; производительность по исходной жидкости $Q = 0,2; 0,4$ м³/ч; динамической вязкости $\mu = 0,01; 0,04$ Па·с; начальная счётная концентрация твердой фазы в суспензии $c_0 = 0,01 = 1\%$.

В качестве массовой функции распределения твердой фазы в исходной суспензии выбирали (для простоты, по соглашению)

$$F_0(\delta) = \begin{cases} \delta/\delta_{\max} & \text{при } 0 < \delta \leq \delta_{\max} \\ 1 & \text{при } \delta > \delta_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

где, $\delta_{\max} = 10^{-5}$ м.

Предполагается, что пробная двухфазная жидкостная система (типа сахарного утфеля) с объемной концентрацией c_0 твердого и заданной счётной функцией $F(\delta)$ распределения твердой фазы по крупности равномерно перемешана в этой системе, причем плотность ρ_1 твердой фазы превышает плотность ρ жидкостной фазы.

Требуется, обрабатывая эту суспензию в центробежной машине, получить с её помощью частицы размером $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$, где δ_1, δ_2 – соответственно – наименьший и наибольший диаметр частиц заданной целевой крупности, другими словами, произвести систематизацию (фракционирование) частиц в заданном размерном диапазоне.

Решение поставленной задачи проводили на базе научного положения о движущейся по заданной траектории частицы с критическим диаметром $\delta_{кр}$ (рисунок 1). А именно, это положение состоит в том, что в рабочем объеме машины частицы размером, превышающие $\delta_{кр}$, осаждаются раньше, чем частицы размером не более, чем $\delta < \delta_{кр}$.

Соответственно, так называемая траектория: *BC* – частицы текущим критическим диаметром, *AC* – частицы глобальным (по Г.И. Бремеру) критическим диаметром (рисунок 1).

Эта (гипотетическая) особенность поведения частицы критическим диаметром в рабочем объеме центрифуги создает предпосылки обосновать математическую модель организации такого режима работы машины, чтобы была обеспечена, в основном, аккумуляция частиц размером $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$ в данном объеме.

В теории седиментации по Г.И. Бремеру под понятием «глобальный критический диаметр» понимают научное положение о том, что при разделении суспензии частицы размером не менее чем δ_k , полностью уходят в осадок (одновременно с некоторыми частицами меньшим диаметром).

В соответствии с этим при первой обработке исходной суспензии с параметром управления $\delta_{гп} = \delta_2$ и угловой скоростью ω_1 может быть записан коэффициент уноса

$$\varepsilon_1 = \frac{n}{n_0} = \frac{2}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R F_0(\delta(r)) r dr, \quad (9)$$

где, соответственно, n – число частиц в фугате, ε_1 – относительное число частиц в фугате, то есть в расположенной над линией *AC* области потока, $F_0(\delta)$ – счётная функция распределения частиц в исходной суспензии.

Отмеченная особенность процесса осветления данной жидкостной смеси может быть эффективно использована при обосновании аналитического приближённого выражения $F_1(\delta)$ функции распределения на последующем после нулевого этапа обработки порошкообразной субстанции с функцией распределения $F_0(\delta)$.

А именно, в качестве функции распределения используется зависимость

$$F_1(\delta) = \begin{cases} F_0(\delta) & \text{при } \delta < \delta_{гп}, \\ F_0(\delta_{гп}) & \text{при } \delta < \delta_{гп}. \end{cases} \quad (10)$$

И так далее, со своим $\delta_{гп}$, по каждому из этапов расчёта.

Принимая во внимание (7), например, для коэффициента уноса ε_2 (5) в явном виде получают

$$\varepsilon_2 = \frac{2}{R^2 - r_0^2} \int_{r_0}^R F_1(\delta(r, \omega, c_0, \mu)) r dt, \quad (11)$$

где F_1 задано по (10), $\delta(r, \omega, c_0)$ – по (5).

Формулы (1)–(11) полагают в основу численного анализа процесса фракционирования порошкообразной субстанции в роторе трубчатой центрифуги, принимая в качестве параметра управления процесса фракционирования частиц на этой машине зависящие от граничных значений $\delta_{гп} = \delta_1$ или δ_2 диапазона целевой фракции (10) угловую скорость ω ротора.

В качестве параметра управления процессом (ПУ) выбирали, последовательно, размеры пробных частиц δ_2 и δ_1 . Эти значения параметров процесса согласно (8) и (9) принимаются в качестве заданных глобальных критических диаметров, сначала $\delta_{гп2} = \delta_2$, где в соответствии с (5) $\omega_2 = V(c_0) \gamma l(r_0) / \delta_2$, а затем $\delta_{гп1} = \delta_1$.

При этом на базе формул (1), (2) можно сделать заключение о том, соответствующие угловые скорости ротора машины связаны соотношением $\omega_1 = \omega_2 \delta_1 / \delta_2$.

Образовавшийся осадок с частицами в количестве $n_1 = n_0 \varepsilon_1$, где ε_1 определяемый по (9) коэффициент уноса, удаляют.

На втором этапе с пробной частицей $\delta_{гп} = \delta_1$ при угловой скорости $\omega = \omega_2$ обрабатывают фугат (принимая во внимание, что он уже освобождён от частиц размером больше, чем δ_2) имеют целью сохранить в фугате частиц размером, превышающем δ . Что реализуют на базе коэффициента осветления $\eta_2 = 1 - \varepsilon_2$, где ε_2 определяют по (11), $\eta_2 = n_2 / (n_0 \varepsilon_1)$, n_2 – число отошедших в осадок в фугате частиц размером $\delta_1 < \delta < \delta_2$ (вместе с некоторой долей частиц размером меньшим δ_1).

По своему смыслу коэффициент осветления η_2 определяет относительное (в долях к количеству $(n_0 - n_1) = n_0 \varepsilon_1$) число частиц, принадлежащих целевому интервалу $\delta \in (\delta_1, \delta_2)$.

После чего фугат высушивают, а полученную порошкообразную субстанцию используют как затравочный материал.

Численный эксперимент

Расчеты проводили (в дополнение к данным расчетного примера к формуле (2)) на базе параметров: радиус свободной поверхности жидкости $r_0 = 0,015$ м; производительность по исходной жидкости $Q = 0,2; 0,4$ м³/ч; динамической вязкости $\mu = 0,05$ Па·с; начальная концентрация твердой фазы в суспензии $c_0 = 1\%, 2\%$.

В качестве счётной функции распределения твердой фазы в исходной суспензии выбирали (8) (по соглашению, рисунок 1), в качестве заданных глобальных критических диаметров частиц заданного целевого диапазона фракционирования $\delta_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ м; $\delta_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ м.

Расчёты выполнялись на базе Mathcad 2000 [13].

Результаты

Визуализация кривых на рисунках 2–5 подтверждает согласие с физическим смыслом исследуемой проблемы. Результаты проведенных

аналитических и числовых расчетов процесса фракционирования частиц по этапам проведенного исследования и они имеют убывающий характер.

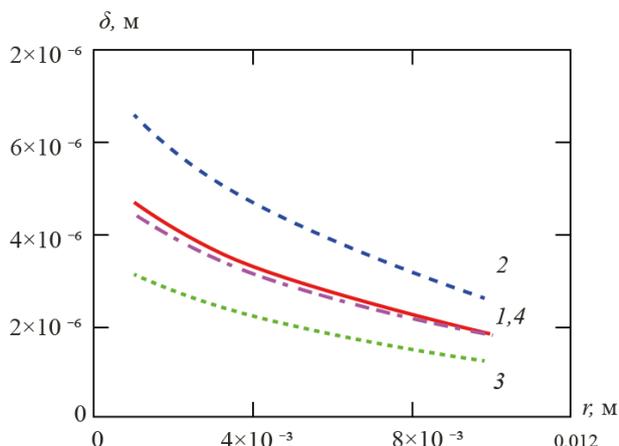


Рисунок 2. Зависимость величины критического диаметра δ пробной частицы от радиальной координаты r при параметрической зависимости диаметра δ от угловой скорости ω и объёмной концентрации c_0 твёрдого ($\mu = 0,05 \text{ Па} \times \text{с}$; $\omega = 1380 \text{ с}^{-1}$: 1 – $c_0 = 0,01$; 2 – $c_0 = 0,02$; $\omega = 2060 \text{ с}^{-1}$: 3 – $c_0 = 0,01$; 4 – $c_0 = 0,02$)

Figure 2. Dependence of the critical diameter δ of a test particle on the radial coordinate r with a parametric dependence of the diameter δ on the angular velocity ω and the volume concentration c_0 of solids ($\mu = 0,05 \text{ Па} \times \text{с}$; $\omega = 1380 \text{ с}^{-1}$: 1 – $c_0 = 0,01$; 2 – $c_0 = 0,02$; $\omega = 2060 \text{ с}^{-1}$: 3 – $c_0 = 0,01$; 4 – $c_0 = 0,02$)

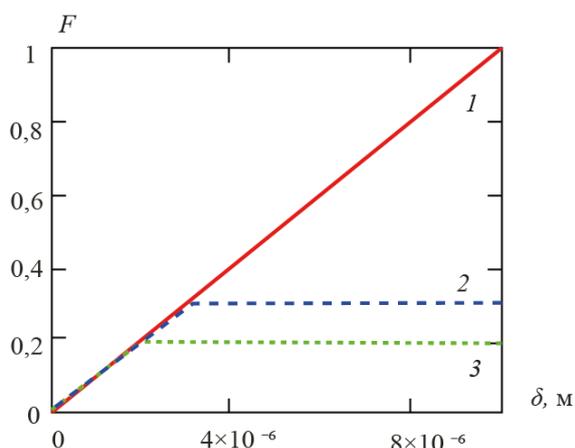


Рисунок 4. Коэффициенты уноса ε_1 и ε_2 в зависимости от радиуса r_0 свободной поверхности суспензии и параметрической зависимости от угловой скорости ω и объёмной концентрации c_0 твёрдого ($\mu = 0,05 \text{ Па} \times \text{с}$; $\omega = 1380 \text{ с}^{-1}$: 1 – $c_0 = 0,01$; 2 – $c_0 = 0,02$; $\omega = 2060 \text{ с}^{-1}$: 3 – $c_0 = 0,01$; 4 – $c_0 = 0,02$)

Figure 4. Entrainment coefficients ε_1 and ε_2 depending on the radius r_0 of the free surface of the suspension and the parametric dependence on the angular velocity ω and volume concentration c_0 ($\mu = 0,05 \text{ Па} \times \text{с}$; $\omega = 1380 \text{ с}^{-1}$: 1 – $c_0 = 0,01$; 2 – $c_0 = 0,02$; $\omega = 2060 \text{ с}^{-1}$: 3 – $c_0 = 0,01$; 4 – $c_0 = 0,02$)

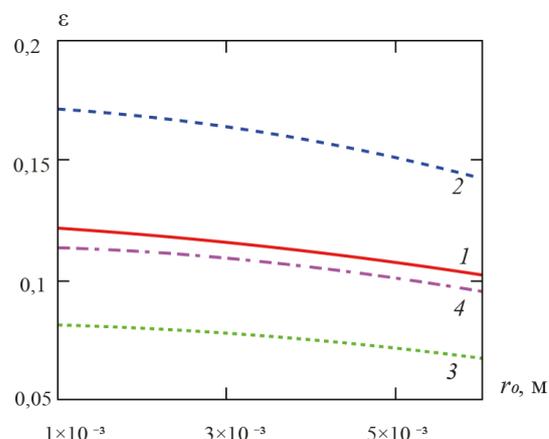


Рисунок 3. Функции счётного распределения частиц, соответственно, 1 – $F_0(\delta)$ в исходной суспензии; 2 – $F_1(\delta)$ и 3 – $F_2(\delta)$ – по первому и второму этапам расчёта по первому и второму этапам расчёта

Figure 3. Countable distribution functions of particles, respectively, 1 – $F_0(\delta)$ in the initial suspension; 2 – $F_1(\delta)$ and 3 – $F_2(\delta)$ – for the first and second stages of calculation

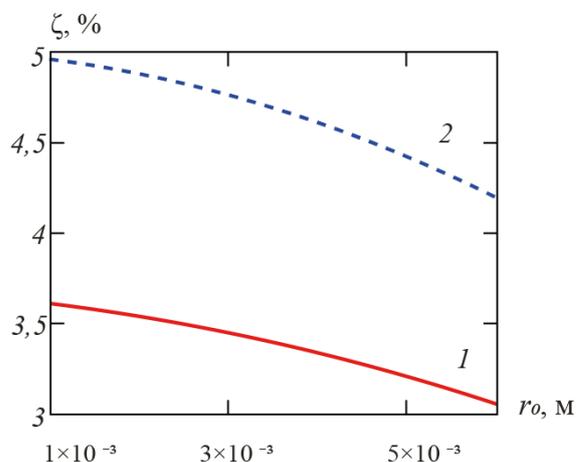


Рисунок 5. Относительное по исходному составу порошка счётное (%) содержание ζ частиц целевого размерного диапазона при параметрической зависимости от объёмной концентрации c_0 твёрдого (1 – $c_0 = 0,01$; 2 – $c_0 = 0,02$)

Figure 5. Relative to the initial composition of the powder, countable (%) content ζ of particles of the target size with a parameter depending on the volumetric mass c_0 of the solid (1 – $c_0 = 0,01$; 2 – $c_0 = 0,02$)

Обсуждение

В рамках постановки задачи, и с учетом данных (рисунки 2, 3, 4), анализ отражённых кривыми этих рисунков, при прочих фиксированных расчетных параметрах процесса показывает, что с увеличением частоты вращения ротора машины содержание частиц, вследствие осаждения их на стенке ротора, всегда снижается (т. е., эффективность работы машины возрастает).

В свою очередь, эффективность процесса обработки затравочного материала, естественным образом, снижается как с увеличением объёмного содержания с твёрдой фазы, так и с ростом производительности машины: например, на рисунке 2 кривая 2 выше кривой 1.

Следует иметь в виду, что предметом исследования является количественный анализ процесса фракционирования исходного затравочного материала заданного объёма по двум последовательным, независимо друг от друга,

этапам обработки с коэффициентами уноса ε_1 и ε_2 по каждому из них. Поэтому расчёт эффективности процесса проводили на базе величины синтетического коэффициента уноса $\zeta = \varepsilon_1(1 - \varepsilon_2)$, результаты расчёта которого представлены кривыми на рисунке 5.

Заключение

В рамках положений гидродинамики тонкослойного быстровращающегося потока жидкости с взвешенном в нём порошком заданного гранулометрического состава из тонкодисперсных частиц в роторе трубчатой центрифуги впервые предложена методика расчёта для данной машины процедура выделения из порошка совокупности частиц целевого размерного диапазона. Что может быть эффективно использовано для расчёта процесса фракционирования порошка при проектировании инновационных образцов центрифугального оборудования с целью реализации на нём этого процесса.

Литература

- 1 Никулина О.К., Колоскова О.В., Яковлева М.Р., Дымар О.В. Применение электродиализа для очистки диффузионного сока в сахарном производстве // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2021. Т. 14. № 3. С. 51–61.
- 2 Семенов Е.В., Славянский А.А., Карамзин В.А. Количественное моделирование процесса разделения суспензий в роторе фильтрующей центрифуги периодического действия // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 11. С. 7–10.
- 3 Гурьева К.Б., Тарасова Е.А. Оценка объективности метода определения гранулометрического состава сахара-песка // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2014. № 2. С. 80–86.
- 4 Крутлик С.В. Об оптимизации технологии на отдельных стадиях производства сахара // Сахар. 2020. № 4. С. 27–35.
- 5 Хабибуллин М.Я. Повышение эффективности разделения жидких систем на основе улучшения энергетических характеристик в роторах фильтрующих центрифуг различных конструкций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 7. С. 149–156.
- 6 Salunkhe V.G., Desavale R., Khot S.M., Yelve N. et al. Identification of bearing clearance in sugar centrifuge using dimension theory and support vector machine on vibration measurement // Journal of nondestructive evaluation, diagnostics and prognostics of engineering systems. 2024. P. 1–26.
- 7 Romahadi D., Luthfie A.A., Suprihatiningsih W., Xiong H. Designing expert system for centrifugal using vibration signal and Bayesian Networks // Int. J. Adv. Sci. Eng. Technol. 2022. V. 12. № 1. P. 23.
- 8 Babaoglu N.U., Parvaz F., Hosseini S.H., Elsayed K. et al. Influence of the inlet cross-sectional shape on the performance of a multi-inlet gas cyclone // Powder Technology. 2021. V. 384. P. 82–99. doi:10.1016/j.powtec.2021.02.008
- 9 Olatunde A., Obidola M.S., Tijjani H. Centrifugation techniques // Analytical Techniques in Biosciences. Academic Press, 2022. P. 43–58. doi: 10.1016/B978-0-12-822654-4.00008-7
- 10 Babu A.S., Adeyeye S.A.O. Extraction of sugar from sugar beets and cane sugar // Extraction Processes in the Food Industry. Woodhead Publishing, 2024. P. 177–196. doi:10.1016/B978-0-12-819516-1.00007-7
- 11 Gandhi K., Sharma N., Brath Gautam P., Sharma R. et al. Centrifugation // Advanced Analytical Techniques in Dairy Chemistry. New York, NY: Springer US, 2022. P. 85–102.
- 12 Osman A., Rajab F. Exploring the dynamic growth of sugar crystals: A volume diffusion non-steady state model under variable conditions // AIP Advances. 2023. V. 13. № 6. doi:10.1063/5.0153275
- 13 Qodirova G.H., Ismoilova M.N. Chiziqli algebraik tenglamalar tizimini mathcad dasturi yordamida yechish // Educational Research in Universal Sciences. 2024. V. 3. № 2. P. 650–654.
- 14 de Castro B.J.C., Marciniuk M., Giulietti M., Bernardo A. Sucrose crystallization: modeling and evaluation of production responses to typical process fluctuations // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2019. V. 36. № 3. P. 1237–1253. doi: 10.1590/0104-6632.20190363s20180240
- 15 Singh K., Gupta S.P., Kumar A., Kumar A. The effect of high intensity ultrasound (HIU) on the kinetics of crystallization of sucrose: Elimination of latent period // Ultrasonics sonochemistry. 2019. V. 52. P. 19–24. doi: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.030
- 16 Berzins K., Suryanarayanan R. Compression-induced crystallization in sucrose-polyvinylpyrrolidone amorphous solid dispersions // Crystal Growth & Design. 2018. V. 18. № 2. P. 839–848. doi: 10.1021/acs.cgd.7b01305
- 17 Hubbes S.S., Braun A., Foerst P. Sugar particles and their role in crystallization kinetics and structural properties in fats used for nougat creme production // Journal of Food Engineering. 2020. V. 287. P. 110130. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110130
- 18 Khaddour I., Bento L., Ferreira A., Rocha F. Kinetics and thermodynamics of sucrose crystallization from pure solution at different initial supersaturations // Surface Science. 2010. P. 1208–1214. doi: 10.1016/j.susc.2010.04.005

19 Zaiets N., Vlasenko L., Lutska N. Neural Network Model for Predicting Technological Losses of a Sugar Factory // Conference on Automation. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P. 93–104.

20 Cheng M.H., H. Huang, B.S Dien, V. Singh. The costs of sugar production from different feedstocks and processing technologies // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2019. T. 13. №. 3. P. 723–739. doi:10.1002/bbb.1976

References

1 Nikulina O.K., Koloskova O.V., Yakovleva M.R., Dymar O.V. Application of electro dialysis for purification of diffusion juice in sugar production. Food industry: science and technology. 2021. vol. 14. no. 3. pp. 51–61. (in Russian).

2 Semenov E.V., Slavyansky A.A., Karamzin V.A. Quantitative modeling of the process of separation of suspensions in the rotor of a batch filter centrifuge. Chemical and oil and gas engineering. 2014. no. 11. pp. 7–10. (in Russian).

3 Guryeva K.B., Tarasova E.A. Assessing the objectivity of the method for determining the granulometric composition of granulated sugar. Innovative technologies for the production and storage of material assets for state needs. 2014.n. 2. pp. 80–86. (in Russian).

4 Kruglik S.V. On optimization of technology at individual stages of sugar production. Sugar. 2020. no. 4. pp. 27–35. (in Russian).

5 Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems based on improving the energy characteristics in the rotors of filtering centrifuges of various designs. News of the Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2022. vol. 333. no. 7. pp. 149–156. (in Russian).

6 Salunkhe V.G., Desavale R., Khot S.M., Yelve N. et al. Identification of bearing clearance in sugar centrifuge using dimension theory and support vector machine on vibration measurement. Journal of nondestructive evaluation, diagnostics and prognostics of engineering systems. 2024. pp. 1–26.

7 Romahadi D., Luthfie A.A., Suprihatiningsih W., Xiong H. Designing expert system for centrifugal using vibration signal and Bayesian Networks. Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol. 2022. vol. 12. no. 1. pp. 23.

8 Babaoglu N.U., Parvaz F., Hosseini S.H., Elsayed K. et al. Influence of the inlet cross-sectional shape on the performance of a multi-inlet gas cyclone. Powder Technology. 2021. vol. 384. pp. 82–99. doi:10.1016/j.powtec.2021.02.008

9 Olatunde A., Obidola M.S., Tijjani H. Centrifugation techniques. Analytical Techniques in Biosciences. Academic Press, 2022. pp. 43–58. doi: 10.1016/B978-0-12-822654-4.00008-7

10 Babu A.S., Adeyeye S.A.O. Extraction of sugar from sugar beets and cane sugar. Extraction Processes in the Food Industry. Woodhead Publishing, 2024. pp. 177–196. doi:10.1016/B978-0-12-819516-1.00007-7

11 Gandhi K., Sharma N., Brath Gautam P., Sharma R. et al. Centrifugation. Advanced Analytical Techniques in Dairy Chemistry. New York, NY, Springer US, 2022. p. 85–102.

12 Osman A., Rajab F. Exploring the dynamic growth of sugar crystals: A volume diffusion non-steady state model under variable conditions. AIP Advances. 2023. vol. 13. no. 6. doi:10.1063/5.0153275 (in Russian).

13 Kadirova G.H., Ismailova M.N. Solving the system of linear algebraic equations using the mathcad program // Educational Research in Universal Sciences. 2024. V. 3. No. 2. P. 650–654. (in Uzbek).

14 de Castro B.J.C., Marciniuk M., Giulietti M., Bernardo A. Sucrose crystallization: modeling and evaluation of production responses to typical process fluctuations. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2019. vol. 36. no. 3. pp. 1237–1253. doi: 10.1590/0104-6632.20190363s20180240

15 Singh K., Gupta S.P., Kumar A., Kumar A. The effect of high intensity ultrasound (HIU) on the kinetics of crystallization of sucrose: Elimination of latent period. Ultrasonics sonochemistry. 2019. vol. 52. pp. 19–24. doi: 10.1016/j.ulsonch.2018.05.030

16 Berzins K., Suryanarayanan R. Compression-induced crystallization in sucrose-polyvinylpyrrolidone amorphous solid dispersions. Crystal Growth & Design. 2018. vol. 18. no. 2. pp. 839–848. doi: 10.1021/acs.cgd.7b01305

17 Hubbes S.S., Braun A., Foerst P. Sugar particles and their role in crystallization kinetics and structural properties in fats used for nougat creme production. Journal of Food Engineering. 2020. vol. 287. pp. 110130. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110130

18 Khaddour I., Bento L., Ferreira A., Rocha F. Kinetics and thermodynamics of sucrose crystallization from pure solution at different initial supersaturations. Surface Science. 2010. pp. 1208–1214. doi: 10.1016/j.susc.2010.04.005

19 Zaiets N., Vlasenko L., Lutska N. Neural Network Model for Predicting Technological Losses of a Sugar Factory. Conference on Automation. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. pp. 93–104.

20 Cheng M.H., H. Huang, B.S Dien, V. Singh. The costs of sugar production from different feedstocks and processing technologies. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2019. vol. 13. no. 3. pp. 723–739. doi:10.1002/bbb.197

Сведения об авторах

Вера А. Грибкова к.т.н., доцент, кафедра инновационных технологий продуктов из растительного сырья, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, vera_gribkova@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5079-8132>

Евгений В. Семенов д.т.н., главный научный сотрудник, проблемная научно-исследовательская лаборатория (ПНИЛ) «Конструирование и внедрение продуктов и рационов персонализированного питания», Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, sem-post@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6203-1783>

Information about authors

Vera A. Gribkova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, innovative technologies of products from plant raw materials department, Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Zemlyanoy Val Str., 73, Moscow, 109004, Russia, vera_gribkova@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5079-8132>

Evgeny V. Semenov Dr. Sci. (Engin.), chief researcher, problem research laboratory (PNRL) “Design and implementation of personalized nutrition products and diets”, Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Zemlyanoy Val Str., 73, Moscow, 109004, Russia, sem-post@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6203-1783>

Анатолий А. Славянский д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра инновационных технологий продуктов из растительного сырья, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, anatoliy4455@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0262-8841>

Дарья П. Митрошина ассистент, кафедра инновационных технологий продуктов из растительного сырья, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, ул. Земляной Вал, 73, г. Москва, 109004, Россия, d_mitr96@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Сергей Т. Антипов д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ast@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4299-1538>

Anatoly A. Slavyansky Dr. Sci. (Engin.), head of department, innovative technologies of products from plant raw materials department, Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Zemlyanoy Val Str., 73, Moscow, 109004, Russia, anatoliy4455@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0262-8841>

Daria P. Mitroshina assistant, innovative technologies of products from plant raw materials department, Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Zemlyanoy Val Str., 73, Moscow, 109004, Russia, d_mitr96@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8724-3368>

Sergey T. Antipov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatuses for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394036, Russia, ast@vsuet.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-4299-1538>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All authors contributed equally to the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

| | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Поступила 11/04/2024 | После редакции 29/04/2024 | Принята в печать 14/05/2024 |
| Received 11/04/2024 | Accepted in revised 29/04/2024 | Accepted 14/05/2024 |