

УДК 66.067.57:66.012.37

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЖИДКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В РОТОРАХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЦЕНТРИФУГ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Хабибуллин Марат Яхиевич,  
m-hab@mail.ru

Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Октябрьский),  
Россия, 452607, г. Октябрьский, ул. Девонская, 54а.

**Актуальность** исследования обусловлены необходимостью обеспечить более эффективную экономичность, повышения надежности и долговечности, эффективности и производительности работы центрифуг. Требуется получение и изучение их энергетических характеристик, особенно связанных с затратами энергии на преодоление различных вредных сопротивлений. Получение энергетических характеристик центрифуг также необходимо для создания новых приводов, так как применяемая в настоящее время в приводах промышленных центрифуг ременная передача имеет существенные недостатки, отдельные из которых недопустимы.

**Цель:** на основании результатов экспериментальных исследований предложить новую математическую модель движения разделяемой системы в роторах фильтрующих центрифуг с центробежной и шнековой выгрузкой осадка при тонкослойном фильтровании суспензий со среднезернистой твердой фазой и объемной концентрацией меньше 60 %.

**Объекты.** Исследуются процессы в роторах фильтрующих центрифуг с центробежной и шнековой выгрузкой осадка при тонкослойном фильтровании суспензий со среднезернистой твердой фазой. Экспериментально в роторах рассматриваемых центрифуг удастся различить две зоны – зону напорного фильтрования и зону центробежного отжима. При нарушении режима фильтрования суспензия из зоны напорного фильтрования может попадать в зону центробежного отжима. В местах прорывов суспензии, как и в зоне напорного фильтрования, слой осадка смывается.

**Методы.** Согласно разработанной математической модели, ротор по образующей разделен на две зоны. В зоне I осадок отсутствует, он смывается потоком суспензии и отбрасывается в зону II, где происходит накопление осадка с объемной влажностью порядка 40–50 %. Осадок в зоне II накапливается до тех пор, пока напряжения от тангенциальной составляющей центробежной силы не станут равными внутренним касательным напряжениям в осадке. После этого осадок начинает двигаться вдоль ротора, постепенно освобождаясь от влаги. Для определения длины зоны напорного фильтрования составлено дифференциальное уравнение, описывающее течение жидкости вдоль ротора (в виде тонкой пленки) с одновременной фильтрацией ее через сито. Рассматривается движение осадка в зоне II. В первом приближении к реологической модели принимается осадок за неньютоновскую жидкость.

**Результаты.** Предложенная на основе проведенных аналитических и экспериментальных исследований математическая модель движения разделяемой системы в коническом роторе позволяет определить длину зоны напорного фильтрования и рассчитать параметры процесса, обеспечивающие наличие в роторе зоны осадка, а также определить продолжительность пребывания осадка в роторе, зная которую можно по известным формулам вычислить влажность получаемого осадка.

### Ключевые слова:

Трубчатые, фильтрующие центрифуги, механизм движения разделяемой системы, производительность, частота вращения ротора.

### Введение

Во многих отраслях народного хозяйства в настоящее время для разделения стойких жидких неоднородных систем широко применяют фильтрующие и трубчатые центрифуги с шнековой выгрузкой осадка, которые отличаются высокими факторами разделения. Они широко применяются и при бурении эксплуатационных скважин для очистки бурового раствора от выбуренного шлама. Повышение надежности и долговечности, эффективности и производительности, а также экономичности центрифуг требует получения и изучения их энергетических характеристик, особенно связанных с затратами энергии на преодоление различных вредных сопротивлений. Получение энергетических характеристик центрифуг также необходимо для создания новых приводов, так как применяемая в настоящее время в приводах промышленных центрифуг ременная передача имеет существенные недостатки, отдельные из которых недопустимы [1–4].

Энергетические показатели трубчатой центрифуги может характеризовать любая зависимость, позволяющая определять необходимую для привода центрифуги мощность при заданных производительности и частоте вращения ротора. Например, зависимость момента на валу центрифуги от частоты вращения ее ротора при различных значениях производительности или зависимость необходимой для привода центрифуги мощности от передаточного числа привода и др. Мощность  $N_d$ , требуемая для привода трубчатой центрифуги, складывается из технологической мощности  $N_t$ , необходимой для обеспечения собственно процесса центрифугирования, и мощностей  $N_p$ ,  $N_f$  и  $N_a$ , необходимых для преодоления сопротивлений соответственно в подшипниках, гидравлического и аэродинамического [5–7].

Технологическую мощность определяют по известной формуле [8]:

$$N_t = 0,5m_c v_{\text{вых}}^2, \quad (1)$$

где  $m_c$  – секундный массовый расход суспензии, кг/с;  $v_{\text{вых}}$  – абсолютная скорость фугата на выходе из головки ротора центрифуги, м/с.

При инженерных расчетах значение  $v_{\text{вых}}$  обычно заменяют близким ему значением  $v_{\text{окр}}$  – окружной скорости ротора на радиусе расположения выпускных каналов; кроме того, не учитывают затраты энергии на распыление вытекающего фугата, а для осветляющих центрифуг пренебрегают затратами энергии на раскручивание частиц твердой фазы. Как показали экспериментальные исследования, для учета этих факторов в зависимости (1) необходимо ввести поправочный коэффициент 1,32. Тогда технологическую мощность определяем согласно выражению (2):

$$N_t = 0,66 m_c v_{\text{окр}}^2. \quad (2)$$

Потери на трение в подшипниках качения верхней опоры могут быть учтены коэффициентом полезного действия подшипника  $\eta_{\text{п}}=0,98$ . Мощность для преодоления потерь на трение в подшипнике скольжения нижней опоры определяют по формуле [9]

$$N_{\text{п}} = f_{\text{тр}} P_{\text{п}} v_{\text{в}}, \quad (3)$$

где  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $P_{\text{п}}$  – радиальная нагрузка на подшипник, Н;  $v_{\text{в}}$  – окружная скорость шейки вала, м/с.

Гидравлические потери при течении суспензии в трубчатом роторе центрифуги определить аналитически крайне затруднительно вследствие сложности процесса. Однако на основании экспериментальных исследований [10–17] рекомендуется принимать (4):

$$N_{\text{г}} \approx 0,6 N_t. \quad (4)$$

Вследствие того, что в общем балансе энергии центрифуги гидравлические потери составляют всего 10–12 %, можно пользоваться приведенной рекомендацией.

Аэродинамические потери в общем балансе энергии центрифуги составляют 50–60 % [18–22], при этом с увеличением частоты вращения ротора (т. е. в перспективе развития центрифуг) эти потери резко возрастают. Вопросу определения аэродинамических потерь вращающихся роторов центрифуг и сепараторов посвящено много работ, анализ которых показывает, что большинство зависимостей получены экспериментально в различных условиях, вследствие чего они количественно и качественно различаются.

Сходную структуру имеют зависимости, рекомендованные в работах [23], аэродинамическую мощность определяют по формуле (5):

$$N_a = c_3 \rho L R_p^4 \omega^3, \quad (5)$$

где  $c_3$  – экспериментальный коэффициент;  $\rho$  – удельная плотность среды, в которой вращается ротор центрифуги, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – длина ротора центрифуги, м;  $R_p$  – наружный радиус ротора, м;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора, с<sup>-1</sup>.

Зависимость, рекомендованная в работе [24], получена на основании анализа гидродинамики потока среды в зазоре между вращающимся ротором и неподвижным кожухом центрифуги. Влияние величины

этого зазора на аэродинамические потери учтено параметром [25], определяемым по формуле (6):

$$A = 0,018 - 0,068 m^2 + 0,115 m^3 - 0,048 m^4, \quad (6)$$

где  $m = R_p/R_k$ ;  $R_k$  – внутренний радиус кожуха, м.

Тогда мощность будет определяться по выражению (7):

$$N_a = c_3 A \rho L R_p^4 \omega^3. \quad (7)$$

Анализ выражения (6) показывает, что зависимость  $A=f(m)$  имеет минимум при  $\approx 0,6$ , т. е. соотношение  $R_p/R_k \approx 0,6$  является наиболее выгодным с энергетической точки зрения.

В результате экспериментальных исследований было получено значение коэффициента  $c_3=1,07$ , учитывающего в основном потери на торцах ротора, которыми при теоретическом анализе пренебрегали.

Таким образом, зависимости (2)–(4), (7) позволяют вычислять отдельные составляющие и, следовательно, суммарную мощность, необходимую для привода трубчатой центрифуги при различных значениях ее производительности и частоты вращения ротора.

На рис. 1 представлены моментные характеристики промышленной трубчатой центрифуги ОТР-151К-01 при ее работе на воде, рассчитанные по данным формулам, а также результаты экспериментальных измерений [26–28]. Расхождение расчетных и экспериментальных величин крутящего момента на валу центрифуги не превышает 4 %.

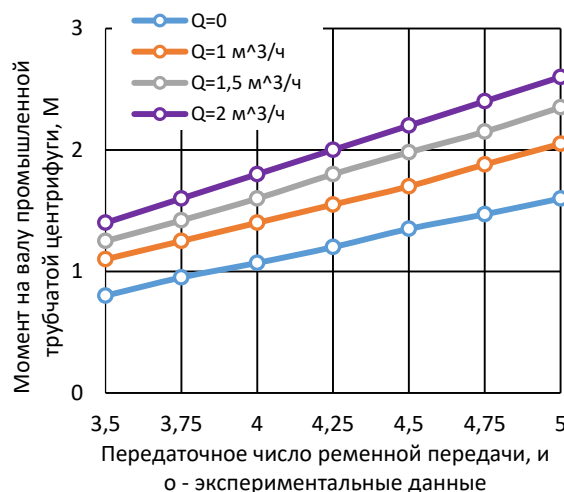


Рис. 1. Расчетные зависимости момента  $M$  на валу промышленной трубчатой центрифуги ОТР-151К-01 при ее работе на воде от передаточного числа  $u$  и привода при различной производительности  $Q$  (частота вращения вала двигателя 2900 об/мин)

Fig. 1. Calculated dependences of the moment  $M$  on the shaft of the tubular industrial centrifuge OTR-151K-01 during its operation on water on the gear ratio  $u$  and the drive at different performance  $Q$  (frequency of rotation of the motor shaft 2900 rpm)

Экспериментальные исследования были проведены на промышленной трубчатой центрифуге ОТР-151К-01 [29]. Передаточное число ременной передачи варьировали сменными шкивами, производительность цен-

трифуги измеряли объемным методом. Для измерения крутящего момента на валу центрифуги была применена специально сконструированная измерительная головка, содержащая торсионметр. Угол закручивания торсионного валика, линейно зависящий от измеряемого крутящего момента, определяли при помощи стробоскопического тахометра 2ТСт 32-456. При этом сразу измеряли частоту вращения входного вала и, следовательно, ротора центрифуги.

Экспериментальные исследования были проведены на промышленной трубчатой центрифуге ОТР-152К-1, модернизированной для использования во взрывоопасных производствах [30]. Как было установлено в процессе этих исследований, полученные моментные характеристики трубчатой центрифуги ОТР-151К-01 при ее работе на воде можно с достаточной для инженерной практики точностью (до 6–7 %) распространить на ряд других продуктов, например полиэфирные лаки и минеральные масла, имеющие несколько меньшую плотность и большую вязкость по сравнению с водой [31].

Конструкции фильтрующих центрифуг, у которых шнековая выгрузка осадка, эксплуатируются в различных химических производствах; начато внедрение в промышленность центрифуг с центробежной выгрузкой осадка. Исследование центробежного фильтрования суспензий с объемной концентрацией 50–60 % позволило выявить закономерности процесса, протекающего в этих центрифугах [32–36].

На начальной стадии процесса фильтрования отделение жидкой фазы практически не связано с увеличением толщины слоя осадка и с соответствующим возрастанием сопротивления при фильтровании. В данном случае основное влияние на процесс оказывает не сопротивление слоя осадка, который размывает-

ся поступающей в ротор суспензией, а сопротивление фильтрующей перегородки (листового сита). Поэтому для начальной стадии первого периода процесса тонкослойного центробежного фильтрования вместо термина «фильтрование с образованием осадка» было предложено применять термин «напорное фильтрование».

На начальной стадии процесса фильтрования отделение жидкой фазы практически не связано с увеличением толщины слоя осадка и с соответствующим возрастанием сопротивления при фильтровании. В данном случае основное влияние на процесс оказывает не сопротивление слоя осадка, который размывается поступающей в ротор суспензией, а сопротивление фильтрующей перегородки (листового сита). Поэтому для начальной стадии первого периода процесса тонкослойного центробежного фильтрования вместо термина «фильтрование с образованием осадка» было предложено применять термин «напорное фильтрование».

Экспериментально в роторах рассматриваемых центрифуг удается различить две зоны – зону напорного фильтрования и зону центробежного отжима (рис. 2). При нарушении режима фильтрования суспензия из зоны напорного фильтрования может попадать в зону центробежного отжима. В местах прорывов суспензии, как и в зоне напорного фильтрования, слой осадка смывается [37, 38].

На основании результатов экспериментальных исследований предложена новая математическая модель движения разделяемой системы в роторах фильтрующих центрифуг с шнековой и центробежной выгрузкой осадка в случае тонкослойного фильтрования суспензий со среднезернистой твердой фазой и объемной концентрацией меньше 60 % [39–42].

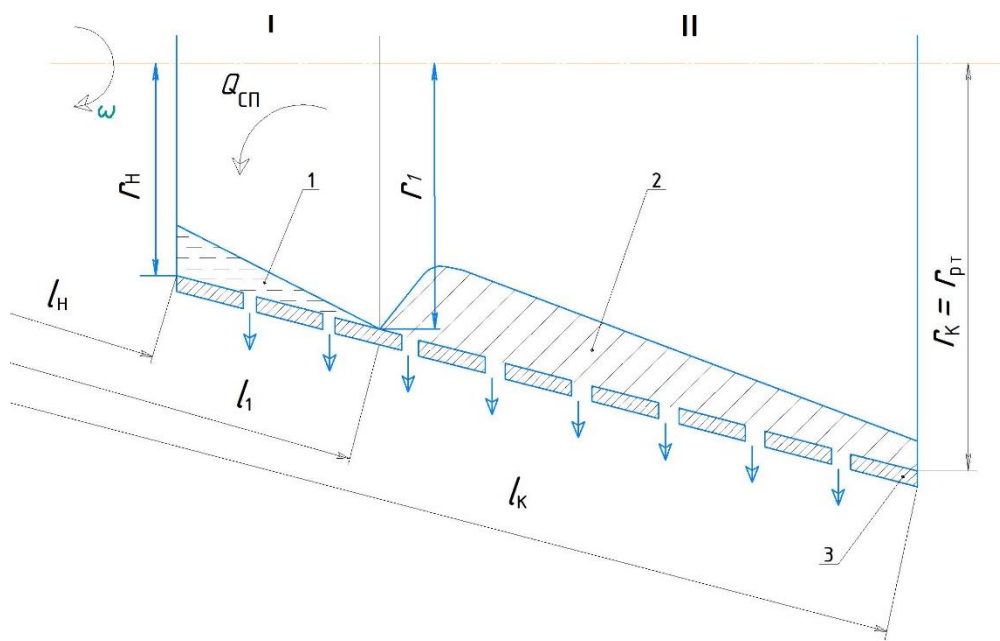


Рис. 2. Схема тонкослойного центробежного фильтрования. I – зона напорного фильтрования; II – зона центробежного отжима; 1 – жидкость; 2 – осадок; 3 – стенка ротора

Fig. 2. Scheme of thin-layer centrifugal filtration. I – pressure filtration zone; II – zone of centrifugal extraction; 1 – liquid; 2 – sediment; 3 – rotor wall

Согласно этой модели, ротор по образующей разделен на зоны *I* и *II* (рис. 2).

В зоне *I* осадок здесь отсутствует, он смыывается суспензией и выбрасывается в зону *II*, где происходит его накопление с объемной влажностью порядка 40–50 %. Осадок в зоне *II* накапливается до тех пор, пока напряжения от тангенциальной составляющей центробежной силы не станут равными внутренним касательным напряжениям в осадке. После этого осадок начинает двигаться вдоль ротора, постепенно освобождаясь от влаги. Для определения длины зоны напорного фильтрования составлено дифференциальное уравнение, описывающее течение жидкости вдоль ротора (в виде тонкой пленки) с одновременной фильтрацией ее через сито, которая определяется по формуле (8):

$$\frac{du_{\text{ж}}}{dl} + \frac{1}{3} \left( \frac{u_{\text{ж}}}{l} \right) + A_1 l = 0, \quad (8)$$

где  $u_{\text{ж}}$  – средняя по толщине скорость течения пленки, м/с;  $l$  – расстояние до вершины конуса вдоль образующей, м;  $A_1 = \frac{\omega^2 \sin 2\alpha}{2\nu\beta}$ ;  $\omega$  – угловая скорость ротора, с<sup>-1</sup>;  $\alpha$  – угол наклона образующей конуса, град.;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – сопротивление фильтрующей перегородки (коэффициент).

В результате интегрирования уравнения (8) и подстановки граничного условия  $u_{\text{ж}}|_{l=l_{\text{н}}}=u_{\text{ж.н}}$  получим уравнение (9):

$$u_{\text{ж}} = u_{\text{ж.н}} \left( \frac{l_{\text{н}}}{l} \right)^{1/3} - \frac{3}{7} \frac{A_1}{l^{1/3}} \left( l^{7/3} - l_{\text{н}}^{7/3} \right), \quad (9)$$

где  $u_{\text{ж.н}} = \left( \frac{Q^2 \omega^2}{12\pi^2 \nu l_{\text{н}}} \right)^{1/3}$ ;  $l_{\text{н}}$  – расстояние от вершины конуса до начала ротора, м;  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/с.

Толщина пленки жидкости непрерывно уменьшается, и при достижении координаты  $l=l_1$  (рис. 2) напорное фильтрование прекращается. Решив уравнение (9) при  $l=l_1$ , в случае  $u_{\text{ж}}=u_{\text{ж.н}}=0$  определяем  $l_1$  по формуле (10):

$$l_1 = l_{\text{н}} \left[ \frac{7}{3A_1} \frac{u_{\text{ж.н}}}{l_{\text{н}}^2} + 1 \right]^{3/7}. \quad (10)$$

Для проведения нормальной работы центрифуги значение длины зоны напорного фильтрования ( $l_1-l_{\text{н}}$ ) не может превышать 25–30 % от общей длины, образующей поверхности конического ротора. Задавая значение длины зоны напорного фильтрования, из выражения (10) находим максимально допустимую производительность жидкости, при которой осуществляется оптимальный режим работы центрифуги. Производительность по жидкости в зоне напорного фильтрования определяем из следующего соотношения [43] по формуле (11):

$$Q = \frac{2\sqrt{3}\pi\omega^2}{\nu \sin^2 \alpha} \left[ \frac{3 \cos \alpha}{7\beta} \left( r_1^{7/3} - r_{\text{н}}^{7/3} \right) \right]^{3/2}, \quad (11)$$

где  $r_1$  – радиус ротора на границе зон, м;  $r_{\text{н}}$  – начальный радиус ротора, м.

Рассмотрим движение осадка в зоне *II*. В первом приближении к реологической модели примем осадок за неньютоновскую жидкость. Необходимо составить уравнение баланса сил для элементарного слоя осадка толщиной  $dn$  (здесь  $n$  – нормаль к образующей конического ротора) и длиной  $dl$  (где  $l$  – компонента вектора количества движения), который находится под действием центробежной силы и сил внутреннего трения. В результате это уравнение можно представить в формуле (12):

$$\frac{d\tau^*}{dn} = \rho_{\text{ос}} \omega^2 r \sin \alpha, \quad (12)$$

где  $\tau^*$  – касательное напряжение, МПа;  $\rho_{\text{ос}}$  – плотность осадка, кг/м<sup>3</sup>.

Интегрируя дифференциальное уравнение (12) с учетом граничного условия  $\tau^*|_{n=0}=0$ , получим касательное напряжение, которое определяется по формуле (13):

$$\tau^* = \rho_{\text{ос}} \omega^2 r n \sin \alpha. \quad (13)$$

Градиент скорости сдвига пропорционален касательному напряжению [44]. Тогда для движущегося осадка дифференциальное уравнение запишется формулой (14):

$$-\frac{du_{\text{ос}}}{dn} = f(\tau^*), \quad (14)$$

где  $u_{\text{ос}}$  – скорость сдвига осадка, м/с.

Максимальные напряжения имеют место у стенки (сита) и определяются по формуле (15):

$$\tau_{\text{ст}}^* = \rho_{\text{ос}} \omega r h_{\text{ос}} \sin \alpha, \quad (15)$$

где  $h_{\text{ос}}$  – толщина осадка, м.

Таким образом, касательные напряжения определяются по формуле (16):

$$\tau^* = \tau_{\text{ст}}^* \frac{n}{h_{\text{ос}}}. \quad (16)$$

Подставив зависимость (16) в уравнение (15), после его интегрирования можно определить распределение скорости  $u_{\text{ос}}$  по толщине слоя осадка по выражению (17):

$$u_{\text{ос}} = \int_n^{h_{\text{ос}}} f \left( \tau_{\text{ст}}^* \frac{n}{h_{\text{ос}}} \right) dn. \quad (17)$$

Объемный расход осадка [44] определяется по формуле (18):

$$Q_{\text{ос}} = \frac{2\pi r h_{\text{ос}}^2}{(\tau_{\text{ст}}^*)^2} \int_0^{\tau_{\text{ст}}^*} \tau^* f(\tau^*) d\tau^*. \quad (18)$$

Для дилатантной жидкости в соответствии со степенным законом  $\tau^* = k_0 \left( \frac{du_{\text{ос}}}{dn} \right)^{m_0}$  получим функцию касательного напряжения, определяемую по формуле (19):

$$f(\tau^*) = \left( \frac{\tau^*}{k_0} \right)^{1/m_0}, \quad (19)$$

где  $k_0, m_0$  – постоянные.

После подстановки функции (19) в уравнение (18) и интегрирования с учетом выражения (15) находим объемный расход осадка по формуле (20):

$$Q_{oc} = \frac{2\pi r h_{oc}^2 m_0}{2m_0 + 1} \times \left[ \frac{\rho_{oc} \omega^2 r h_{oc} \sin \alpha}{k_0} \right]^{1/m_0}. \quad (20)$$

Тогда средняя скорость сдвига по толщине слоя осадка будет определяться по выражению (21):

$$(u_{oc})_{cp} = \left[ \left( \frac{m_0}{2m_0 + 1} \right)^{m_0} \times \left( \frac{\rho_{oc} \omega^2 \sin \alpha}{k_0} \right) \left( \frac{Q_{oc}}{2\pi} \right)^{m_0+1} r^{-m_0} \right]^{\frac{1}{2m_0+1}}. \quad (21)$$

Аналогичное выражение для  $(u_{oc})_{cp}$  получено несколько иным методом в работе [45].

В заключение находим продолжительность пребывания осадка в роторе по формуле (22):

$$\tau_{up} = \int_{r_1}^{r_{pt}} \frac{dr}{(u_{oc})_{cp} \sin \alpha} = \left[ \frac{(2m_0 + 1)^{3m_0+1}}{m_0^2 (3m_0 + 1)^{2m_0+1}} \times \left( \frac{k_0}{\rho_{oc} \omega^2} \right) \left( \frac{2\pi}{Q_{oc} \sin^2 \alpha} \right)^{m_0+1} \right]^{\frac{1}{2m_0+1}} \times \left[ r_{pt}^{\frac{3m_0+1}{2m_0+1}} - r_1^{\frac{3m_0+1}{2m_0+1}} \right], \quad (22)$$

где  $r_{pt}$  – максимальный радиус ротора, м.

### Заключение

Предложенная модель движения разделяемой системы в коническом роторе позволяет определить длину зоны напорного фильтрования и рассчитать параметры процесса, обеспечивающие наличие в роторе зоны осадка, а также определить продолжительность пребывания осадка в роторе, зная которую можно по известным формулам вычислить влажность получаемого осадка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Очистка воды бассейнов длительной выдержки атомных станций // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2010. – № 6. – С. 12–15.
- Гиляев Ген.Г., Хабибуллин М.Я., Гиляев Г.Г. Перспективы применения кислотного геля для закачки пропанта в процессе проведения гидроразрыва карбонатных пластов на территории самарской области // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 8. – С. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57
- Kuzin M.A. Vibration reliability and endurance of a centrifuge for separating suspensions // Chemical and Petroleum Engineering. Springer Science+Business Media. – 2010. – V. 46. – P. 45–50. DOI: 10.1007/S10556-010-9287-8.
- Жутиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Изд-во «Химия», 1980. – 398 с.
- Хабибуллин М.Я. Повышение долговечности и надежности работы центробежных сепараторов путем применения новых материалов // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 107–112. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112
- Critical review on the active site structure of sulfated zirconia catalysts and prospects in fuel production / G.X. Yan, A. Wang, I.E. Wachs, J. Baltusaitis // Applied Catalysis A: General. – 2019. – V. 572. – P. 210–225.
- Alkane isomerization over sulfated zirconia solid acid system / P. Wang, Y. Yue, T. Wang, X. Bao // International Journal of Energy Research. – 2020. – V. 44 (5). – P. 3270–3294.
- A study of fluorine-containing catalysts based on MOR and BEA zeolites in isomerization of n-hexane / O.V. Dzhikiya, M.D. Smolikov, E.A. Belopukhov et al. // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2285 (1). – P. 020005. DOI: 10.1063/5.0027245
- Прошин И.А. Управление в вентильно-электрохимических системах. Кн. Вторая. Математическое моделирование вентильно-электрохимических систем. – Пенза: Изд-во ПТИ, 2002. – 307 с.
- Хабибуллин М.Я. Совершенствование процесса солянокислотной обработки скважин применением новейших технологий и оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 128–134. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
- Серпокрылов Н.С., Шербаков А.С. Доочистка шахтных вод на фильтрах с песчаной загрузкой // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/434/ (дата обращения 15.05.2022).
- Лаптев А.Г., Бородай Е.Н. Математическая модель процесса адсорбции при очистке сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4. – С. 144–149
- Лукьяненко В.М., Таранец А.В. Центрифуги. – М.: Изд-во «Химия», 1988. – 384 с.
- Хабибуллин М.Я. Увеличение эффективности разделения жидких систем при сборе пластовой жидкости // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 64–71. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71
- Разделение суспензий в химической промышленности / Т.А. Малиновская, И.А. Кобринский, О.С. Кирсанов, В.В. Рейнфарт. – М.: Изд-во «Химия», 1983. – 264 с.
- Хабибуллин М.Я. Исследование процессов, происходящих в колонне труб при устьевой импульсной закачке жидкости в скважину // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 34–39. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39
- Weiland R.H., McPherson R.R. Accelerated settling by addition of buoyant particles // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. – 1979. – V. 40. – P. 45–49.
- Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering 2019. – 2019. – P. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
- Patwardhan V.S., Tien C. Sedimentation and liquid fluidization of solid particles of different sizes and densities // Chemical Engineering Science: X-Journals. – 1985. – V. 40. – P. 1051–1060.
- Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
- Соколов В.И., Соколов Н.В. Совершенствование процесса сепарирования жидких неоднородных систем // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1986. – № 3. – С. 15–16.
- Wissentan A. Biochemical basis of free and immobilized enzyme application in industry, analysis and therapy // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 1980. – V. 30. – P. 521–529.
- Langeloh Th., Stahl W. Der einfluss des schleppreffektes auf die klarung in dekantier-zentrifugen // Aufbereitungs-technik. – 1989. – V. 6. – P. 331–337.
- Семенов Е.В., Карамзин В.А., Поляков В.И. Расчет формы рабочей поверхности центрифуги // Теоретические основы химической технологии. – 1985. – Т. 19. – № 4. – С. 564–567.
- Welke G., Dresenkamp B. Zur Qualitat sicherrung von Trypsin zur Zellzucht // Archiv für Experimentelle Veterinaermedizin – speciation.net. – 1988. – V. 42. – P. 302–307.
- Kuzin M.A. Simulation and vibrational reliability of centrifuge for separating suspensions // Russian Engineering Research. – 2009. – V. 29. – P. 1099–1101. DOI: 10.3103/S1068798X09110069.

27. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
28. Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Патронный фильтр для очистки воды бассейнов длительной выдержки атомных станций // Экология и промышленность России. – 2010. – № 6 – С. 12–13.
29. Прошин И.А., Бурков В.В. Математическое моделирование процессов центрифугирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 11. – С. 71–74.
30. Федотов К.В., Тютюнин В.В. Моделирование процессов гравитационного обогащения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – № 37. – С. 176–181.
31. Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Применение метода аналогии для расчета трубчатого текстильного фильтра и систем очистки на его основе // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2010. – № 4. – С. 36–37.
32. Миньков Ж.И., Пикущак Е.В., Дик И.Г. Моделирование седиментации частиц полидисперсной суспензии в тарельчатой центрифуге // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 79–88.
33. Пичулин В.С., Лукьянюк В.Ю., Соболева А.Ю. Центрифуги короткого радиуса (ЦКР) как гидростатическая модель земной гравитации // Труды МАИ. – 2008. – № 32. – С. 1–11.
34. Павлова Н.В., Павлов И.Н., Тушкина Т.М. О численном моделировании двухфазных течений в роторе лабораторной центрифуги // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1–2. – С. 11–15.
35. Кузин М.А., Панин И.Н., Цимбалюк Е.П. Фильтровально-адсорбционная очистка воды с использованием насыпных кварцевых фильтров // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2009. – № 4. – С. 8–9.
36. Пуленец Н.Е. Задачи и методы обеспечения прочности роторов испытательных центрифуг // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2006. – № 5-1 (47). – С. 192–197.
37. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Математические модели и методы расчетов теплообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. – Казань: Казанский Государственный Энергетический Университет, 2021. – 288 с.
38. Семенов Е.В., Карамзин В.А. О разделении суспензии в роторе осадительной фильтрующей центрифуги // Теоретические основы химической технологии. – 2007. – Т. 41. – № 2. – С. 183–190.
39. Кузин М.А. Вибрационная надёжность центрифуги // Нелинейный мир. – 2010. – № 11. – С. 724–728.
40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines // Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry». – 2019. – P. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Douglas N.M. Sedimentation centrifuges // Know what you need 11 Chem. Eng. – 1988. – March 28. – V. 95. – P. 42–51.
42. Minnini G., Spinosa L., Santory M. Centrifugation: influence of operating variables on cake concentration // 7 Eur. Abwasser und abfallsymg. EWPCA. – Munchen, 19–22 Mai, 1987. Doc. Pt. 1. St. Augustin. – 1987. – P. 488–499.
43. Kuzin M.A. Vibration reliability and lifetime of centrifuge // Abstracts of III International Pyroprocessing Research Conference: «IRPC-2010». – Dimitrovgrad, 2010. – V. 29. – P. 49.
44. Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Ч. 2. Тепло массообменные процессы / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, Е.А. Лаптева, Т.М. Фарахов. – Казань: Центр инновационных технологий, 2020. – 565 с.
45. Records A., Sutherland K. Decanter centrifuge handbook // Alan Records, Ken Sutherland. 1. ed. – Oxford: Elsevier advanced technology, 2001. – V. XI – P. 421.

Поступила 15.06.2022 г.

#### Информация об авторах

**Хабибуллин М.Я.**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепромысловых машин и оборудования, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Октябрьский.

UDC 66.067.57:66.012.37

## INCREASING THE EFFICIENCY OF SEPARATING LIQUID SYSTEMS ON THE BASIS OF IMPROVING ENERGY CHARACTERISTICS IN ROTORS OF FILTERING CENTRIFUGES OF VARIOUS DESIGNS

**Marat Ya. Khabibullin,**  
m-hab@mail.ru

Institute of Oil and Gas of Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky),  
54a, Devonskaya avenue, Oktyabrsky, 452607, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to provide more efficient economy, improve reliability and durability, efficiency and productivity of centrifuges. It is required to obtain and study their energy characteristics, especially those associated with energy costs to overcome various harmful resistances. Obtaining the energy characteristics of centrifuges is also necessary to create new drives, since the belt drive currently used in industrial centrifuge drives has significant drawbacks, some of which are unacceptable.

**Purpose:** based on the results of experimental studies, propose a new mathematical model for a separated system movement in the rotors of filter centrifuges with centrifugal and screw unloading of sediment in thin-layer filtration of suspensions with a medium-grained solid phase and a volume concentration of less than 60 %.

**Objects.** The processes in the rotors of filtering centrifuges with centrifugal and screw unloading of sludge during thin-layer filtration of suspensions with a medium-grained solid phase are studied. Experimentally, in the rotors of the centrifuges under consideration, it is possible to distinguish two zones – the pressure filtration zone and the centrifugal pressing zone. If the filtration mode is violated, the suspension from the pressure filtration zone can fall into the centrifugal pressing zone. In places of suspension breakthroughs, as well as in the pressure filtration zone, the sediment layer is washed off.

**Methods.** According to the developed mathematical model, the rotor is divided into two zones along the generatrix. There is no sediment in zone I, it is washed away by the suspension flow and thrown into zone II, where sediment is accumulated with a volumetric moisture content of about 40–50 %. Sediment in zone II is accumulated until the stresses from the tangential component of the centrifugal force become equal to the internal shear stresses in the sediment. After that, the sediment begins to move along the rotor, gradually freeing itself from moisture. To determine the length of the pressure filtration zone, a differential equation was compiled that describes the flow of liquid along the rotor (in the form of a thin film) with its simultaneous filtration through a sieve. The sediment movement in zone II is considered. In the first approximation to the rheological model, the sediment is taken as a non-Newtonian liquid.

**Results.** The mathematical model of the movement of the separated system in the conical rotor proposed on the basis of the conducted analytical and experimental studies makes it possible to determine the length of the pressure filtration zone and calculate the process parameters that ensure the presence of a zone and sediment in the rotor, as well as determine the duration of the sediment in the rotor, knowing which, one can according to known formulas, calculate the moisture content of the resulting sediment.

### Key words:

Tubular, filtering centrifuges, mechanism of movement of the divided system, productivity, rotor speed.

### REFERENCES

- Kuzin M.A., Panin I.N., Tsymbalyuk E.P. Purification of water in long-term storage pools of nuclear power plants. *Water treatment, water treatment, water supply*, 2010, no. 6, pp. 12–15. In Rus.
- Gilaev G.G., Khabibullin M.Ya., Gilaev G.G. Prospects for the use of acid gel for proppant injection in the process of hydraulic fracturing of carbonate reservoirs in the Samara region. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2020, no. 8, pp. 54–57. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-54-57. In Rus.
- Kuzin M.A. Vibration reliability and endurance of a centrifuge for separating suspensions. *Chemical and Petroleum Engineering, Springer Science+Business Media*, 2010, vol. 46, pp. 45–50. DOI: 10.1007/S10556-010-9287-8.
- Zhuzhikov V.A. *Filtrovaniye. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and practice of separation of suspensions]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 398 p.
- Khabibullin M.Ya. Improving the durability and reliability of centrifugal separators by using new materials. *Oil and Gas Business*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 107–112. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-3-107-112.
- Yan G.X., Wang A., Wachs I.E., Baltrusaitis J. Critical review on the active site structure of sulfated zirconia catalysts and prospects in fuel production. *Applied Catalysis A: General*, 2019, vol. 572, pp. 210–225.
- Wang P., Yue Y., Wang T., Bao X. Alkane isomerization over sulfated zirconia solid acid system. *International Journal of Energy Research*, 2020, vol. 44 (5), pp. 3270–3294.
- Dzhikiya O.V., Smolnikov M.D., Belopukhov E.A. A study of fluorine-containing catalysts based on MOR and BEA zeolites in isomerization of n-hexane. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2285 (1), pp. 020005. DOI: 10.1063 / 5.0027245
- Proshin I.A. *Upravlenie v ventilno-elektromekhanicheskikh sistemakh. Kn. 2. Matematicheskoe modelirovaniye ventilno-elektromekhanicheskikh sistem* [Management in valve-electromechanical systems. B. 2. Mathematical modeling of valve-electromechanical systems]. Penza, PTI Publ., 2002. 307 p.
- Khabibullin M.Ya. Improving the process of hydrochloric acid treatment of wells using the latest technologies and equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 128–134. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2861
- Serpokrylov N.S., Shcherbakov A.S. Post-treatment of mine waters on filters with sand loading. *Inzenerny Bulletin of the Don*, 2011, no. 2. In Rus. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/434/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/434/) (accessed 15 May 2022).
- Laptev A.G., Borodai E.N. Mathematical model of the adsorption process in the treatment of wastewater from thermal power plants from oil products. *Engineering Bulletin of the Don*, 2010, no. 4, pp. 144–149. In Rus.
- Lukyanenko V.M., Taranets A.V. *Tsentrifugi* [Centrifuges]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 384 p.
- Khabibullin M.Ya. Increasing the efficiency of separation of liquid systems during the collection of reservoir fluid. *Oil and gas business*, 2020, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-2-64-71.
- Malinovskaya T.A., Kobrinskii I.A., O.S. Kirsanov O.S., V.V. Reinfart V.V. *Razdeleniye suspenziy v khimicheskoy promyshlennosti* [Separation of suspensions in the chemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 264 p.



16. Khabibullin M.Ya. Investigation of the processes occurring in the pipe string during the wellhead pulsed injection of fluid into the well. *Oil and gas business*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 34–39. In Rus. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-34-39.
17. Weiland R.H., McPherson R.R. Accelerated settling by addition of buoyant particles. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1979, vol. 40, pp. 45–49.
18. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya., Suleimanov Re.I. Analysis of the reliability of the power cable of an electric-centrifugal pump unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering* 2019, 2019, pp. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012054
19. Patwardhan V.S., Tien C. Sedimentation and liquid fluidization of solid particles of different sizes and densities. *Chemical Engineering Science: X-Journals*, 1985, vol. 40, pp. 1051–1060.
20. Khabibullin M.Ya., Suleimanov R.I. Automatic packer reliability prediction under pulsed transient flooding of hydrocarbon reservoirs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012024
21. Sokolov V.I., Sokolov N.V. Improving the separation process of liquid heterogeneous systems. *Chemical and oil and gas engineering*, 1986, no. 3, pp. 15–16. In Rus.
22. Wissentan A. Biochemical basis of free and immobilized enzyme application in industry, analysis and therapy. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1980, vol. 30, pp. 521–529.
23. Langeloh Th., Stahl W. Der einfluss des schleppeffektes auf die klarung in dekantier-zentrifugen. *Aufbereitungs-technik*, 1989, vol. 6, pp. 331–337.
24. Semenov E.V., Karamzin V.A., Polyakov V.I. Calculation of the shape of the centrifuge working surface. *Theoretical foundations of chemical technology*, 1985, vol. 19, no. 4, pp. 564–567. In Rus.
25. Welke G., Dresenkamp B. Zur Qualität sicherrung von Trypsin zur Zellzucht. *Archiv für Experimentelle Veterinaermedizin – speciation.net*, 1988, vol. 42, pp. 302–307.
26. Kuzin M. A. Simulation and Vibrational Reliability of Centrifuge for Separating Suspensions. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29, pp. 1099–1101. DOI: 10.3103/S1068798X09110069.
27. Khabibullin M.Ya. Development of the design of the sucker-rod pump for sandy wells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, pp. 012065. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012065
28. Kuzin M.A., Panin I.N., Tsimbalyuk E.P. Cartridge filter for water purification in long-term storage pools of nuclear power plants. *Ecology and Industry of Russia*, 2010, vol. 6, pp. 12–13. In Rus.
29. Proshin I.A., Burkov V.V. Mathematical modeling of centrifugation processes. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 71–74. In Rus.
30. Fedotov K.V., Tyutyunin V.V. Modeling of processes of gravitational enrichment. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2009, no. 37, pp. 176–181. In Rus.
31. Kuzin M.A., Panin I.N., Tsimbalyuk E.P. Application of the analog method for calculating a tubular textile filter and cleaning systems based on it. *Water treatment, water treatment, water supply*, 2010, no. 4, pp. 36–37. In Rus.
32. Minkov J.I., Pikushchak E.V., Dik I.G. Simulation of sedimentation of particles of a polydisperse suspension in a plate centrifuge. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 79–88. In Rus.
33. Pichulin B.C., Lukyanuk V.Yu., Soboleva A.Yu. Short radius centrifuges (SCR) as a hydrostatic model of the Earth's gravity. *Proceedings of MAI*, 2008, no. 32, pp. 1–11. In Rus.
34. Pavlova N.V., Pavlov I.N., Tushkina T.M. On numerical modeling of two-phase flows in the rotor of a laboratory centrifuge. *Polzunovskiy Vestnik*, 2008, no. 1–2, pp. 11–15. In Rus.
35. Kuzin M.A., Panin I.N., Tsimbalyuk E.P. Filtration-adsorption water purification using bulk quartz filters. *Water purification, water treatment, water supply*, 2009, no. 4, pp. 8–9. In Rus.
36. Pulenets N.E. Tasks and methods for ensuring the strength of test centrifuge rotors. *Scientific and technical bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University*, 2006, no. 5-1 (47), pp. 192–197. In Rus.
37. Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A. *Matematicheskie modeli i metody raschetov teplomassoobmennyykh i separatsionnykh protsessov v dvukhfaznykh sredakh* [Mathematical models and methods for calculating heat and mass transfer and separation processes in two-phase media]. Kazan, Kazan State Power Engineering University, 2021. 288 p.
38. Semenov E.V., Karamzin V.A. On the separation of a suspension in the rotor of a precipitating filtering centrifuge. *Theoretical foundations of chemical technology*, 2007, vol. 41, no. 2, pp. 183–190. In Rus.
39. Kuzin M.A. Vibration reliability of a centrifuge. *Non-linear world*, 2010, no. 11, pp. 724–728. In Rus.
40. Khabibullin M.Y. Theoretical grounding and controlling optimal parameters for water flooding tests in field pipelines. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*, 2019, pp. 042013. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042013
41. Douglas N.M. Sedimentation centrifuges. *Know what you need 11 Chem. Eng*, 1988, March 28, vol. 95, pp. 42–51.
42. Minnini G., Spinosa L., Santory M. Centrifugation: influence of operating variables on cake concentration. *7 Eur. Abwasser and abfallsymg. EWPCA*. Munchen, 19–22 May, 1987. pp. 488–499.
43. Kuzin M.A. *Vibration reliability and lifetime of centrifuge. Abstracts of III International Pyroprocessing Research Conference: IRPC-2010*. Dimitrovgrad, 2010. Vol. 29, 49 p.
44. Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A., Farakhov T.M. *Models and efficiency of interfacial transfer processes. P. 2. Heat and mass transfer processes* [Models and efficiency of interfacial transfer processes. P. 2. Heat and mass transfer processes]. Center for Innovative Technologies. Kazan, 2020. 565 p.
45. Records A., Sutherland K. Decanter centrifuge handbook. *Alan Records, Ken Sutherland*. 1<sup>st</sup> ed. Oxford, Elsevier advanced technology, 2001. Vol. XI, 421 p.

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Marat Ya. Khabibullin**, Cand. Sc., associate professor, Institute of Oil and Gas of Ufa State Petroleum Technological University (branch in Oktyabrsky).