

УДК 622.323; 621.6.078

Расчет основных элементов проточной части десендеров циклонного типа с использованием локального мультифазного коэффициента сепарации

А.В. Трулев¹, С.Ф. Тимушев², В.О. Ломакин¹, А.В. Клипов³,
Т.В. Жукова³, Р.А. Кагиров³

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

³ ООО «Римера-Алнас»

Computing main elements of a cyclone-type desender flow part using the local multiphase separation coefficient

A.V. Trulev¹, S.F. Timushev², V.O. Lomakin¹, A.V. Klipov³,
T.V. Zhukova³, R.A. Kagirow³

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Moscow Aviation Institute (National Research University)

³ Rimera-Alnas LLC

В нефтедобывающих скважинах с высоким содержанием механических примесей повышение надежности работы погружных установок с электроцентробежным насосом достигается путем установки на входе десендера циклонного типа. Десендер защищает погружной насос от попадания в него механических примесей путем их сепарации и сбора в специальном контейнере. Предложена уточненная методика, позволяющая определять основные геометрические размеры деталей десендера. Выведены формулы для определения скорости, расхода и давления запирания, которые представляют собой минимальные значения скорости потока на выходе из шнека, расхода и гидравлических потерь в шнеке, обеспечивающие для мультифазных смесей с определенными физико-химическими свойствами полную сепарацию, сбор и удержание твердых частиц в штатном контейнере.

EDN: EVLDEI, <https://elibrary/evldei>

Ключевые слова: десендер циклонного типа, механические примеси, проточная часть, неподвижный шнек, мультифазный коэффициент, мультифазная смесь

Reliability of the submersible units with an electric centrifugal pump is increased by installing a cyclone-type desender at the inlet in the oil producing wells with high content of the mechanical impurities. Desender protects a submersible pump from mechanical impurities by separating and collecting them in a special container. The paper proposes an upgrade technique making it possible to determine the main geometric dimensions of the mechanical impurity separator (desender) parts. It derives formulas to establish speed, flow rate and shut-off pressure that are representing minimum values of the flow rate at the outlet from the auger, flow rate and hydraulic losses in the auger. With these formulas, complete separation of the solid particles, their collection and retention in a standard container are achieved for the multiphase mixtures with certain physical and chemical properties.

EDN: EVLDEI, <https://elibrary/evldei>

Keywords: cyclone desender, mechanical impurities, flow part, fixed screw, multiphase coefficient, multiphase mixture

Для увеличения коэффициента извлечения нефти применяют новые технологии добычи пластовой жидкости, предусматривающие снижение забойного давления, вследствие чего в пластовой жидкости — мультифазной смеси (МФС) — повышается содержание свободного газа и механических примесей на входе в электрический центробежный насос (ЭЦН) [1–5].

В связи с этим специалисты разрабатывают оборудование для эффективной добычи пластовой жидкости в условиях высокого содержания механических примесей и свободного газа, позволяющее надежно и эффективно добывать МФС с высокой средней наработкой [4–9].

Чтобы повысить эффективность ЭЦН, работающего в нефтедобывающих скважинах с высоким содержанием механических примесей и свободного газа, на входе ЭЦН устанавливают десендер циклонного типа (далее десендер). Десендер предназначен для защиты ЭЦН от попадания механических примесей путем сепарации и сбора в специальном контейнере. Одновременно решают задачу по укрупнению пузырьков свободного газа, которые легче отсепарировать в затрубное пространство, а, следовательно, снизить его содержание на входе в ЭЦН.

Цель работы — проанализировать особенности течения МФС в проточной части десендера с помощью локального мультифазного коэффициента и показать возможности по совершенствованию его конструкции.

Вопросы течения МФС в лопастных решетках рассмотрены в публикациях [6, 10–13]. Исследованию течения жидкой и мультифазной сред численными методами посвящены статьи [7–9, 12–16].

Десендер с дополнительной функцией укрупнения газовых пузырьков обычно устанавливают снизу погружного электродвигателя, отделяя специальной уплотнительной манжетой от ЭЦН, подающего нефть на поверхность. Также десендер можно разместить непосредственно перед входом в ЭЦН (в наземном исполнении).

Результаты исследования работы десендеров для погружных установок приведены в трудах [11, 14, 17–24].

Моделирование МФС с твердыми дискретными частицами (ДЧ). Скорость движения ДЧ относительно скорости течения жидкой фазы в радиальном направлении (относительной скорости движения ДЧ) определяется выражением [10, 25, 26]

$$\Delta v_r = \frac{d_d^2}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{(\rho_d - \rho_m)}{\rho_m} \frac{\Delta p}{\Delta R}, \quad (1)$$

где d_d и ρ_d — диаметр и плотность ДЧ; ρ_m — плотность МФС; ν и $\rho_{\text{ж}}$ — кинематическая вязкость и плотность жидкой фазы; $\Delta p/\Delta R$ — изменение давления МФС Δp на длине средней линии проточной части в радиальном направлении ΔR .

С учетом уравнения Эйлера для установившегося движения

$$a = \frac{1}{\rho_m} \text{grad} p$$

выражение (1) приобретает вид

$$\Delta v_r = \frac{d_d^2}{24\nu} \frac{(\rho_d - \rho_m)}{\rho_{\text{ж}}} a,$$

где a — суммарное ускорение массовых сил.

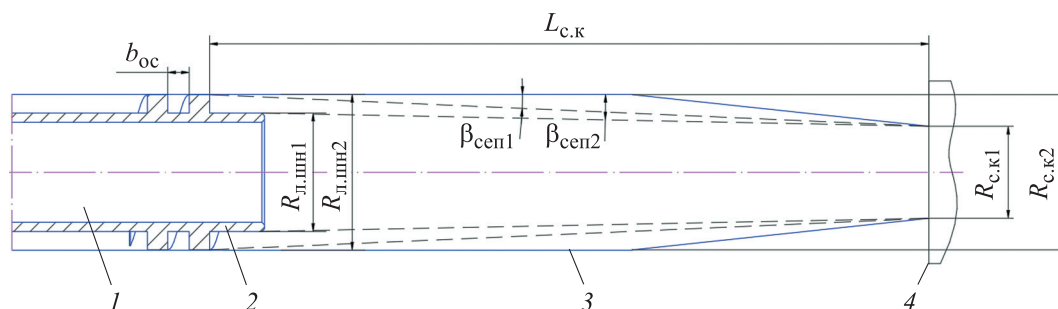


Рис. 1. Эскиз проточной части десендера:

1 — отвод; 2 — шнек; 3 — сепарационная камера; 4 — контейнер для сбора механических примесей

Принимая во внимание, что в радиальном направлении на ДЧ действует только центробежная сила, запишем

$$\frac{\Delta p}{\Delta R} = \rho_m \frac{v_{\text{шн } t}^2}{R_{\text{шн.ср}}} \quad (2)$$

Здесь $v_{\text{шн } t}$ — тангенциальная составляющая скорости движения МФС на выходе из шнека; $R_{\text{шн.ср}}$ — средний радиус шнека,

$$R_{\text{шн.ср}} = \frac{R_{\text{л.шн2}} + R_{\text{л.шн1}}}{2},$$

где $R_{\text{л.шн2}}$ и $R_{\text{л.шн1}}$ — наружный и внутренний радиусы лопаток шнека (рис. 1).

После подстановки выражения (2) в формулу (1) получаем

$$\Delta v_r = \frac{d_d^2 (\rho_d - \rho_m)}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{v_{\text{шн } t}^2}{R_{\text{шн.ср}}}.$$

Тангенциальная составляющая скорости течения МФС на выходе из шнека

$$v_{\text{шн } t} = \frac{Q}{F_t} \quad (3)$$

Здесь Q — расход МФС; F_t — площадь каналов шнека в тангенциальном направлении,

$$\begin{aligned} F_t &= z \left(\frac{S}{z} - b_{\text{л.шн.ос}} \right) (R_{\text{л.шн2}} - R_{\text{л.шн1}}) = \\ &= z b_{\text{ос}} (R_{\text{л.шн2}} - R_{\text{л.шн1}}), \end{aligned}$$

где z — число лопастей шнека; S и $b_{\text{л.шн.ос}}$ — ход и ширина лопасти шнека в осевом направлении, $b_{\text{л.шн.ос}} = b_{\text{л.шн}} / \cos \beta_{\text{л.шн}}$ ($b_{\text{л.шн}}$ — ширина лопасти шнека; $\beta_{\text{л.шн}}$ — угол наклона лопасти шнека); $b_{\text{ос}}$ — ширина канала в осевом направлении,

$$b_{\text{ос}} = \frac{S}{z} - b_{\text{л.шн.ос}}.$$

Площадь одного канала в тангенциальном направлении равна шагу шнека за вычетом ширины лопасти в осевом направлении (см. рис. 1 и 2), умноженному на разность внешнего и внутреннего радиусов шнека. Внешний вид шнека показан на рис. 3.

Угол наклона лопасти шнека $\beta_{\text{л.шн}}$ определяется из соотношения

$$\cos \beta_{\text{л.шн}} = \frac{2\pi R_{\text{шн.ср}}}{S^2 + (2\pi R_{\text{шн.ср}})^2}.$$

Ширина шнека в тангенциальном направлении

$$b_t = b_{\text{ос}} \operatorname{ctg} \beta_{\text{л.шн}}.$$

Средняя по длине сепарационной камеры скорость течения МФС определяется следующими выражениями:

• в тангенциальном направлении

$$v_{t \text{ ср}} = k_{vt} \frac{Q}{F_t};$$

• в осевом направлении

$$v_{\text{ос.ср}} = k_{v \text{ ос}} \frac{Q}{F_t} \frac{1}{\operatorname{ctg} \beta_{\text{л.шн}}} = k_{v \text{ ос}} \frac{Q}{F_t} \frac{S}{2\pi R_{\text{шн.ср}}},$$

где k_{vt} , $k_{v \text{ ос}}$ — коэффициенты.

С учетом этого средняя относительная скорость движения ДЧ

$$\begin{aligned} \Delta v_{r \text{ ср}} &= \frac{d_d^2 (\rho_d - \rho_m)}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{v_{t \text{ ср}}^2}{R_{\text{шн.ср}}} = \\ &= \frac{d_d^2 (\rho_d - \rho_m)}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{k_{vt}^2 v_{\text{шн } t}^2}{R_{\text{шн.ср}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

После подстановки формулы (3) в выражение (4) получаем

$$\Delta v_{r \text{ ср}} = \frac{d_d^2 (\rho_d - \rho_m)}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{k_{vt}^2 Q^2}{F_t^2 R_{\text{шн.ср}}}.$$

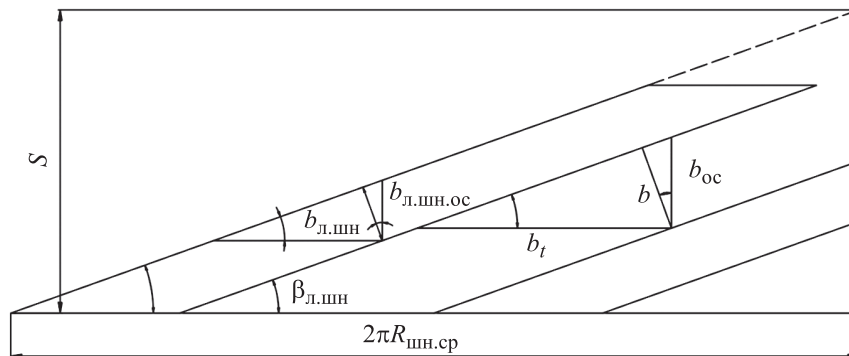


Рис. 2. Схема развертки двухлопастного шнека

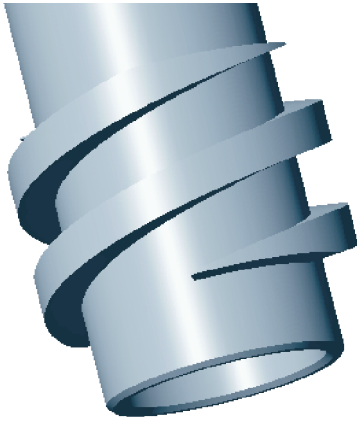


Рис. 3. Внешний вид шнека

Тангенциальная составляющая скорости течения МФС на выходе из шнека вычисляется как

$$v_{\text{шн}t} = v_{\text{шн}} \cos \beta_{\text{л.шн}},$$

где $v_{\text{шн}}$ — скорость течения МФС на выходе из шнека.

Принимая во внимание неразрывность течения МФС и то, что его скорость в направлении отвода $v_{\text{отв}}$ обратно пропорциональна площади отвода $F_{\text{отв}}$, запишем

$$v_{\text{отв}} = \frac{Q}{F_{\text{отв}}} = \frac{Q}{2\pi R_{\text{шн.ср}} L_{\text{с.к}}},$$

где $L_{\text{с.к}}$ — длина сепарационной камеры.

Вышедшие из шнека ДЧ движутся по конусообразной траектории (см. рис. 1), угол наклона которой $\beta_{\text{сепДЧ}}$ определяется из выражения

$$\text{tg} \beta_{\text{сепДЧ}} = \frac{v_{\text{отв}} - \Delta v_{r \text{ ср}}}{v_{\text{ос.ср}}}.$$

Первые ДЧ начинают попадать в штатный контейнер для сбора механических примесей при $\beta_{\text{сепДЧ}} = \beta_{\text{сеп1}}$. Как видно из рис. 1, если $\beta_{\text{сепДЧ}} > \beta_{\text{сеп1}}$, то ДЧ не доходят до контейнера, восходящим потоком уносятся в отвод 1 и далее в ЭЦН:

$$\text{tg} \beta_{\text{сеп1}} = \frac{R_{\text{л.шн2}} - R_{\text{с.к1}}}{L_{\text{с.к}}} = \frac{\Delta R_{\text{с.к}}}{L_{\text{с.к}}},$$

где $R_{\text{с.к1}}$ — радиус на выходе из сепарационной камеры.

При $\beta_{\text{сепДЧ}} \leq \beta_{\text{сеп2}}$ все ДЧ попадают в сепарационную камеру:

$$\text{tg} \beta_{\text{сеп2}} = \frac{R_{\text{л.шн1}} - R_{\text{с.к1}}}{L_{\text{с.к}}}.$$

Отсюда можно вычислить расход МФС, при котором начинается сепарация:

$$Q_{\text{сеп1}} = \frac{12v\rho_{\text{ж}}}{k_{\text{vt}}^2 d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m) L_{\text{с.к}}} F_t^2 - \frac{12v\rho_{\text{ж}}}{k_{\text{vt}}^2 d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m) L_{\text{с.к}}} k_{\text{v oc}} F_t (R_{\text{л.шн2}} - R_{\text{с.к1}}).$$

Аналогично получаем выражение для расхода МФС, начиная с которого происходит полная сепарация механических примесей в штатном контейнере,

$$Q_{\text{сеп2}} = \frac{12v\rho_{\text{ж}}}{k_{\text{vt}}^2 d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m) L_{\text{с.к}}} F_t^2 - \frac{12v\rho_{\text{ж}}}{k_{\text{vt}}^2 d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m) L_{\text{с.к}}} k_{\text{v oc}} F_t (R_{\text{л.шн1}} - R_{\text{с.к1}}).$$

Расход МФС, при котором происходит полная сепарация ДЧ, их сбор и удержание в штатном контейнере (далее расход запираения),

$$Q_{\text{зап}} = \frac{12v\rho_{\text{ж}}}{k_{\text{vt}}^2 d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m) L_{\text{с.к}}} F_t^2. \quad (5)$$

Тогда расход МФС, при котором начинается сепарация ДЧ, представим как

$$Q_{\text{сеп1}} = Q_{\text{зап}} \left[1 - \frac{k_{\text{v oc}} (R_{\text{л.шн2}} - R_{\text{с.к1}})}{F_t} \right].$$

При увеличении расхода МФС в штатный контейнер для сбора механических примесей 4 (см. рис. 1) начинают попадать ДЧ радиусом R , находящимся в диапазоне $R_{\text{л.шн2}} \geq R \geq R_{\text{л.шн1}}$.

Для этого диапазона запишем

$$Q = Q_{\text{зап}} \left[1 - \frac{k_{\text{v oc}} (R - R_{\text{с.к1}})}{F_t} \right].$$

Отсюда получаем

$$R = R_{\text{с.к1}} + \frac{F_t}{k_{\text{v oc}}} \left(1 - \frac{Q}{Q_{\text{зап}}} \right).$$

Коэффициент сепарации, определяемый как отношение отсепарированных ДЧ к общему количеству ДЧ, в зависимости от расхода МФС имеет вид

$$k_{\text{сеп}}(Q) = \frac{R_{\text{л.шн2}}^2 - R^2}{R_{\text{л.шн2}}^2 - R_{\text{л.шн1}}^2} = \frac{R_{\text{л.шн2}}^2 - \left[R_{\text{с.к1}} + \frac{F_t}{k_{\text{v oc}}} \left(1 - \frac{Q}{Q_{\text{зап}}} \right) \right]^2}{R_{\text{л.шн2}}^2 - R_{\text{л.шн1}}^2}.$$

Расход запираения определим следующим образом. Чтобы ДЧ не попала в отвод и затем

на вход в ЭЦН, средняя относительная скорость движения ДЧ должна быть больше или равна скорости течения МФС в направлении отвода $v_{отв}$, т. е. $\Delta v_{r\text{ ср}} \geq v_{отв}$.

С учетом выражения (4) имеем

$$v_{отв} \leq k_{vt}^2 \frac{d_d^2 (\rho_d - \rho_m)}{24\nu_{рж}} \frac{v_{t\text{ ср}}^2}{R_{шн.ср}}.$$

Поделив среднюю относительную скорость движения ДЧ (скорость проскальзывания) на среднюю скорость течения МФС в направлении отвода, получаем относительную скорость проскальзывания или локальный мультифазный коэффициент сепарации

$$\begin{aligned} k_{ms} &= \frac{\Delta v_r}{v_{отв}} = k_{vt}^2 \frac{d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m)}{12\nu_{рж}} \frac{L_{с.к}}{F_t^2} Q = \\ &= k_{vt}^2 \frac{d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m)}{12\nu_{рж}} \frac{L_{с.к}}{F_t} v_{шн\ t}. \end{aligned}$$

Причем $k_{ms} = 1$, $Q = Q_{зап}$.

Тангенциальная составляющая скорости течения МФС на выходе из шнека, определяемая выражением (3), является скоростью запираания ДЧ в контейнере в тангенциальном направлении: $v_{шн\ t} = v_{шн.зап\ t}$.

Тогда скорость запираания ДЧ в контейнере

$$v_{шн.зап} = \frac{v_{шн.зап\ t}}{\cos \beta_{л.шн}}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} k_{ms} &= k_{vt}^2 \frac{d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m)}{12\nu_{рж}} \frac{L_{с.к}}{F_t} v_{шн.зап\ t} = \\ &= k_{vt}^2 \frac{d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m)}{12\nu_{рж}} \frac{L_{с.к}}{F_t^2} Q_{зап} = 1; \\ Q_{зап} &= \frac{12\nu_{рж}}{k_{vt}^2 d_d^2 \pi (\rho_d - \rho_m)} \frac{F_t^2}{L_{с.к}}. \end{aligned}$$

При работе на МФС с разными физико-химическими свойствами

$$\frac{Q_{зап1}}{Q_{зап2}} = \frac{v_1 \rho_{ж1}}{d_{d1}^2 (\rho_{d1} - \rho_{m1})} \frac{d_{d2}^2 (\rho_{d2} - \rho_{m2})}{v_2 \rho_{ж2}}.$$

Здесь и далее индексы «1» и «2» соответствуют двум МФС с разными свойствами.

Преобразуя это выражение, получаем уравнение расчета расхода запираания при работе на МФС с разными физико-химическими свойствами

$$Q_{зап2} = \frac{d_{d1}^2}{d_{d2}^2} \frac{v_2 \rho_{ж2}}{v_1 \rho_{ж1}} \frac{(\rho_{d1} - \rho_{m1})}{(\rho_{d2} - \rho_{m2})} Q_{зап1}. \quad (6)$$

При известном значении $Q_{зап1}$, полученным численным методом или при испытаниях на физическом стенде, можно определить $Q_{зап2}$ при работе десендера на МФС с другими физико-химическими свойствами.

Имея результаты испытаний на воде с кварцевым песком и используя формулу (6), можно получить зависимость коэффициента сепарации от подачи вязкой жидкости с пропантом.

Испытания на технической воде с кварцевым песком не представляют большой сложности, а исследования на вязких жидкостях связаны со значительными трудностями, в том числе ввиду сложности поддержания постоянного значения динамической вязкости, которое меняется от нагрева вследствие гидравлических потерь в каналах стенда и сепаратора механических примесей.

Приведенные формулы позволяют отказаться от сложных испытаний и получать требуемые зависимости аналитическим способом.

Площадь каналов проточной части десендера существенно больше, чем площадь каналов в шнеке, и, соответственно, значительно меньше скорость течения МФС. Гидравлическими потерями в каналах можно пренебречь и считать, что в шнеке они пропорциональны скорости течения МФС на выходе из шнека в квадрате:

$$h_{п} \approx k_Q v_{шн\ t}^2 = k_Q \frac{Q^2}{F_t^2},$$

где k_Q — коэффициент гидравлических потерь.

По аналогии с расходом и скоростью запираания введем понятие напора запираания (рис. 4)

$$h_{зап} \approx k_Q v_{шн\ t}^2 = k_Q \frac{Q_{зап}^2}{F_t^2}.$$

Если известны гидравлические потери для одного режима работы $h_{п1}$, то можно получить зависимость потерь для другого режима от расхода МФС

$$h_{п2} \approx h_{п1} \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2.$$

Коэффициент гидравлических потерь

$$k_Q = \frac{F_t^2 h_{зап}}{Q_{зап}^2}.$$

Скорость, расход и напор запираания — это минимальные значения скорости течения МФС на выходе из шнека, расхода и гидравлических потерь в шнеке, при которых для МФС

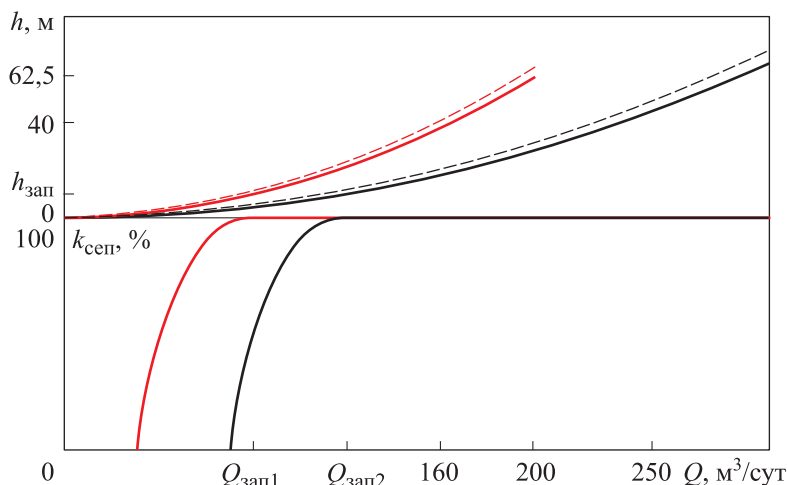


Рис. 4. Зависимости коэффициента сепарации $k_{\text{сеп}}$ и гидравлических потерь h_n для погружных установок габаритов 5 (сплошные линии) и 2А (штриховые линии) от расхода МФС Q десендеров с меньшим (красные линии) и большим (черные линии) ходами шнека

с определенными физико-химическими свойствами происходит полная сепарация механических примесей и их удержание в штатном контейнере, т. е. в контейнере определенного диаметра.

Следует отметить, что вихревое течение потока в сепарационной камере, обеспечивающее сепарацию механических примесей, имеет оптимальное соотношение между длиной и диаметром, при которых не происходит существенного затухания спирального течения МФС [6].

Учитывая, что источником спирального движения является скорость течения МФС на выходе из неподвижного шнека, целесообразно в качестве критерия иметь отношение длины сепарационной камеры к среднему диаметру шнека $D_{\text{шн.ср}}$.

Как показали численные расчеты для погружных установок с габаритами 2А и 5, эффективность сепарации существенно не менялась при соотношении

$$4,6 \leq \frac{L_{\text{с.к.}}}{D_{\text{шн.ср}}} \leq 5,8.$$

В сепарационной камере движутся разнонаправленные в осевом направлении потоки жидкости: в сторону контейнера для сбора механических примесей и из контейнера в сторону ЭЦН через полый шнек [14]. При изменении диаметральных габаритных размеров десендера взаимодействие между этими потоками будет меняться, поэтому целесообразно методами

численного или физического эксперимента уточнять оптимальную длину сепарационной камеры. В противном случае избыточная или недостаточная длина приведет к повышенному расходу и напору запираания.

Из выражения (5) следует, что при изменении радиальных габаритов десендера, оставаясь в рамках рекомендованных соотношений геометрических размеров, для сохранения диапазона работы $Q_{\text{зап}}$ достаточно сохранить площадь каналов проточной части шнека.

Скорость и расход запираания мало зависят от радиуса, так как центробежное ускорение, определяющее скорость проскальзывания, и скорость в направлении отвода пропорциональны радиусу в первой степени. При делении этих величин друг на друга радиусы сокращаются.

В связи с этим эффективность сепарации меняется незначительно при переходе на меньший габарит, например, с габарита 5 на 2А. При этом немного возрастут гидравлические потери, в том числе на запираание ДЧ в штатном контейнере (см. рис. 4).

Для одного габарита целесообразно выполнять сепараторы на разные диапазоны подачи МФС со сменными шнеками.

При работе на одинаковых МФС из уравнения (5) следует, что

$$\frac{Q_{\text{зап1}}}{Q_{\text{зап2}}} = \frac{F_{t1}^2}{F_{t2}^2} = \left[\frac{\left(\frac{S_1}{z_1} - b_{\text{ос1}} \right) (R_{\text{л.шн2}} - R_{\text{л.шн1}})}{\left(\frac{S_2}{z_2} - b_{\text{ос2}} \right) (R_{\text{л.шн2}} - R_{\text{л.шн1}})} \right]^2.$$

Отсюда получаем

$$Q_{\text{зап}2} = \left[\frac{\left(\frac{S_2}{z_2} - b_{\text{oc}2} \right) (R_{\text{л.шн}2} - R_{\text{л.шн}1})}{\left(\frac{S_1}{z_1} - b_{\text{oc}1} \right) (R_{\text{л.шн}2} - R_{\text{л.шн}1})} \right]^2 Q_{\text{зап}1}.$$

Если различия только в ширине лопастей и ходе шнека, то имеем

$$Q_{\text{зап}2} = \left(\frac{\frac{S_2}{z} - b_{\text{oc}2}}{\frac{S_1}{z} - b_{\text{oc}1}} \right)^2 Q_{\text{зап}1}.$$

Пренебрегая шириной лопастей шнека, запишем

$$Q_{\text{зап}2} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 Q_{\text{зап}1}.$$

Расход записания пропорционален отношению площадей проточной части каналов шнека в квадрате. Из этих формул можно определить ход шнека, необходимый для получения требуемого расхода записания.

Приведенные зависимости составляют уточненную методику, позволяющую определять основные геометрические размеры проточной части сепаратора механических примесей.

Модель установки для численных испытаний.

Для испытаний десендера численными методами создана модель стенда, имитирующая работу установки в скважине (рис. 5). Механические примеси подавали через цилиндрический участок, имитирующий колонну. В нижней части десендера устанавливали полноразмерную в радиальном направлении модель контейнера для сбора отсепарированных ДЧ. На выходе из десендера размещали устройство для сбора не отсепарированных частиц. Положение и траекторию каждой ДЧ отслеживали и учитывали.

Так как погружные установки габарита 2А в основном работают в горизонтальных скважи-

нах, для десендера габарита 2А расчет численными методами проводили в горизонтальном положении (см. рис. 5).

Модель и методика при испытаниях численными и физическими методами совпадают. Следует отметить, что отсепарированные ДЧ находятся на дне горизонтально установленного контейнера.

Расчеты проведены в программном комплексе по CFD-анализу с использованием модели Lagrangian: particle-laden flow.

Результаты стендовых испытаний и их обсуждение. Результаты стендовых и опытно-промышленных испытаний различных конструкций десендеров приведены в работах [11, 14, 17–22].

Следует отметить, что в лучших конструктивных вариантах, начиная с определенной подачи МФС, сепарация поддерживается на уровне 100 %. В режимах с меньшим расходом МФС коэффициент сепарации квазилинейно зависит от подачи ЭЦН.

Результаты исследований десендера в виде зависимостей коэффициента сепарации $k_{\text{сеп}}$ от подачи модельной жидкости (воды с кварцевым песком) $Q_{\text{ж}}$, полученных стендовыми испытаниями, численным и аналитическим методами, приведены на рис. 6.

В работе [22] приведены характеристики и результаты анализа стендовых и опытно-промышленных испытаний сепараторов механических примесей, выполненных специалистами ПАО «НК «Роснефть». Одна из наиболее качественных характеристик — зависимость коэффициента сепарации от подачи МФС [22] — идентична приведенной на рис. 6.

Методика исследований описана в работе [11]. При подаче до 100 м³/сут испытания проходили с установленным на выходе из десендера фильтром по методике, которая аналогична описанной в работах [19, 20].

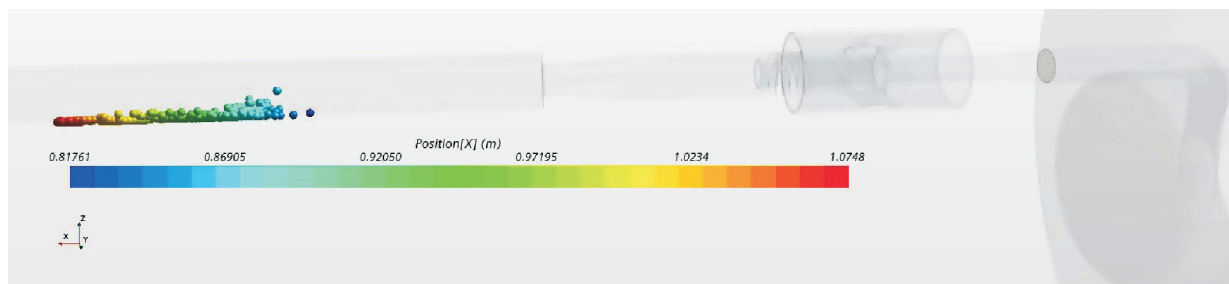


Рис. 5. Модель стенда для испытаний десендера габарита 2А численными методами

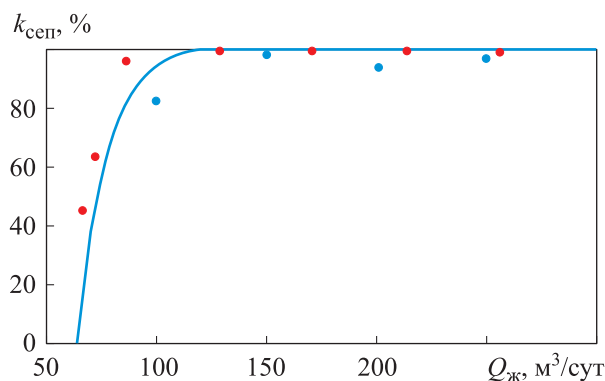


Рис. 6. Зависимости коэффициента сепарации $k_{сеп}$ от подачи модельной жидкости $Q_{ж}$, полученные стендовыми испытаниями (•), численным методом (•), аналитически (—)

Красные точки на рис. 6 соответствуют результатам, найденным численным методом на компьютере, синие — данным, полученным на физическом стенде. Аппроксимирующие кривые по этим точкам и кривая, построенная аналитически по выведенным формулам, примерно совпадают; расхождение составляет 5 %.

Это подтверждает правильность расчетов, проведенных численным и аналитическими методами.

Как правило, получить прямолинейный участок затруднительно в силу погрешности при проведении экспериментов. При использовании правильной методики испытаний наличие горизонтального участка сепарационной кри-

вой, начиная с определенной подачи МФС, является очевидным.

Соответственно, к критериям сравнения десендеров на одинаковые диапазоны подачи модельной жидкости не относится эффективность сепарации, так как с определенного значения подачи она составляет 100 %. Сепараторы могут отличаться друг от друга монтажной высотой, стоимостью, затратами (потерей) напора на сепарацию в заданном рабочем диапазоне и ресурсом.

Выводы

1. Предложена уточненная методика для определения основных геометрических размеров проточной части десендеров с использованием локального мультифазного коэффициента сепарации.

2. Выведены формулы для вычисления скорости, расхода и напора записания, которые представляют минимальные значения скорости течения потока на выходе из шнека, расхода и гидравлических потерь в шнеке, при которых для МФС с определенными физико-химическими свойствами происходит полная сепарация и удержание механических примесей в штатном контейнере.

3. Выведены формулы для определения расхода МФС, при котором начинается сепарация ДЧ.

Литература

- [1] Дроздов А.Н. *Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложненных условиях*. Москва, МАКС Пресс, 2008. 309 с.
- [2] Деньгаев А.В. *Повышение эффективности эксплуатации скважин погружными центробежными насосами при откачке газожидкостных смесей*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. 212 с.
- [3] Агеев Ш.Р., Григорян Е.Е., Макиенко Г.П. *Российские установки лопастных насосов для добычи нефти и их применение*. Пермь, Пресс-Мастер, 2007. 645 с.
- [4] Якимов С.Б. О возможностях оптимизации классов износоустойчивости электроцентробежных насосов на месторождениях ПАО «Оренбургнефть». *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*, 2015, № 3, с. 85–92.
- [5] Трулев А.В., Логинов В.Ф., Горбунов С.И. и др. Разработка и опытно-промышленное внедрение погружных УЭЦН концептуально новой конструкции для эксплуатации малodeбитных скважин с высоким содержанием свободного газа и механических примесей. В: *Сборник работ лауреатов Международного конкурса научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли*. Москва, Формат, 2019, с. 307–310.
- [6] Мусинский А.Н. *Разработка и исследование вихревых газосепараторов для высокодебитных скважин*. Дисс. ... канд. тех. наук. Пермь, ПНИПУ, 2021. 172 с.
- [7] Trulev A., Verbitsky V., Timushev S. et al. Electrical submersible centrifugal pump units of the new generation for the operation of marginal and inactive wells with a high content of

- free gas and mechanical impurities. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 492, art. 012041, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/492/1/012041>
- [8] Trulev A., Timushev S., Lomakin V. Conceptual features of improving the flow-through parts of gas separators of submersible electric pumps systems for the production of formation fluid in order to improve the separating properties, energy efficiency and reliability. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 779, art. 012036, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012036>
- [9] Trulev A., Kayuda M., Timushev S. et al. Conceptual features for improving the flow part of the multiphase stages of ESP submersible plants for small and medium feeds for extracting stratal liquid with a high free gas content. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 779, art. 012042, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012042>
- [10] Мищенко И.Т. *Скважинная добыча нефти*. Москва, Нефть и газ, 2003. 816 с.
- [11] Трулев А.В., Жукова Т.В., Кагиров Р.А. и др. Исследования нового способа работы погружной установки со скважинным сепаратором механических примесей. *Российская отраслевая энергетическая конференция*. URL: https://libgeo.ru/library/roek?product_id=25411&filter=303 (дата обращения: 21.02.2025).
- [12] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical study of the performance loss of a centrifugal pump carrying emulsion. *E3S Web Conf.*, 2021, vol. 321, art. 01010, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132101010>
- [13] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical assessment of the hydrodynamic behavior of a volute centrifugal pump handling emulsion. *Entropy*, 2022, vol. 24, no. 2, art. 221, doi: <https://doi.org/10.3390/e24020221>
- [14] Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Ломакин В.О. и др. Совершенствование проточной части десендеров циклонного типа с использованием мультифазного коэффициента относительной скорости движения дискретных частиц. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 93–106, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-93-106>
- [15] Banjar H., Zhang H.Q. Experiments and emulsion rheology modeling in an electric submersible pump. *Proc. Int. Petroleum Technology Conf.*, 2019, art. IPTC-19463-MS, doi: <https://doi.org/10.2523/iptc-19463-ms>
- [16] Zharkovskii A., Svoboda D., Borshchev I. et al. Axial-flow pump with enhanced cavitation erosion resistance. *Energies*, 2023, vol. 16, art. 1344, doi: <https://doi.org/10.3390/en16031344>
- [17] Анпина Н.А., Каплан А.Л., Пещеренко С.Н. Погружные сепараторы механических примесей. *Бурение и нефть*, 2011, № 12, с. 40–43.
- [18] Сабиров А.А. Стендовые испытания скважинных сепараторов механических примесей. *Инженерная практика*, 2011, № 5, с. 150–155.
- [19] Сабиров А.А., Булат А.В., Зуев А.С. и др. Уточнение методики стендовых испытаний скважинных сепараторов механических примесей. *Территория нефтегаз*, 2011, № 2, с. 22–25.
- [20] Булат А.В. *Повышение эффективности работы скважинного насосного оборудования за счет применения сепараторов механических примесей*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. 139 с.
- [21] Анпина Н.А., Пещеренко С.Н. Математическое моделирование движения твердых частиц в погружных сепараторах. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2012, № 2, с. 62–68.
- [22] Новокрещенных Д.В. Оценка эффективности применения сепараторов механических примесей. *Мат. конф. Эксплуатация осложненного фонда скважин*. Сургут. 2022.
- [23] Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Булат А.В. и др. *Стенд для проведения испытаний скважинных газопесочных сепараторов*. Патент РФ 124497. Заявл. 08.08.2012, опубл. 27.01.2013.
- [24] Трулев А.В., Жуков Т.Ю. *Способ испытания сепаратора механических примесей-укрупнителя газовой фазы и стенд для его осуществления (варианты)*. Патент РФ 2825819. Заявл. 27.02.2024, опубл. 30.08.2024.
- [25] Соу С. *Гидродинамика многофазных систем*. Москва, Мир, 1971. 536 с.

- [26] Ляпков П.Д. Движение сферической частицы относительно жидкости в межлопаточном канале рабочего колеса центробежного насоса. *Труды МИНХ и ГП*, 1977, № 129, с. 3–36.

References

- [1] Drozdov A.N. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefti pogrulzhnymi nasosami v oslozhnennykh usloviyakh* [Technology and technique of oil production by submersible pumps in the complicated conditions]. Moscow, MAKS Press Publ., 2008. 309 p. (In Russ.).
- [2] Dengaev A.V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii skvazhin pogrulzhnymi tsentrobezhnymi nasosami pri otkachke gazozhidkostnykh smesey* [Increase of well operation efficiency by submersible centrifugal pumps during pumping of gas-liquid mixtures]. Moscow, RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2005. 212 p. (In Russ.).
- [3] Ageev Sh.R., Grigoryan E.E., Makienko G.P. *Rossiyskie ustanovki lopastnykh nasosov dlya dobychi nefti i ikh primenenie* [Russian installations of vane pumps for oil production and their application]. Perm, Press-Master Publ., 2007. 645 p. (In Russ.).
- [4] Yakimov S.B. Potential optimization of ESP wear resistance class at Orenburgneft JSC fields. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik OAO «NK «Rosneft»*, 2015, № 3, s. 85–92. (In Russ.).
- [5] Trulev A.V., Loginov V.F., Gorbunov S.I. et al. *Razrabotka i opytно-promyshlennoe vnedrenie pogrulzhnykh UETsN kontseptualno novoy konstruksii dlya ekspluatatsii malodebitnykh skvazhin s vysokim soderzhaniem svobodnogo gaza i mekhanicheskikh primesey* [Development and test output introduction of ESP of conceptually new construction for exploitation of low-debit well with high content free gas and mechanical impurities]. V: *Sbornik rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitie toplivno-energeticheskoy i dobyvayushchey otrasli* [In: Collection of works by laureates of the international contest of scientific, technical and innovative developments aimed at the development of fuel and energy and extractive industry]. Moscow, Format Publ., 2019, pp. 307–310. (In Russ.).
- [6] Musinskiy A.N. *Razrabotka i issledovanie vikhrevykh gazoseparatorov dlya vysokodebitnykh skvazhin*. Diss. kand. tech. nauk [Development and research of vortex gas separators for high-yield wells. Kand. tech. sci. diss.]. Perm, PNIPU Publ., 2021. 172 p. (In Russ.).
- [7] Trulev A., Verbitsky V., Timushev S. et al. Electrical submersible centrifugal pump units of the new generation for the operation of marginal and inactive wells with a high content of free gas and mechanical impurities. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 492, art. 012041, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/492/1/012041>
- [8] Trulev A., Timushev S., Lomakin V. Conceptual features of improving the flow-through parts of gas separators of submersible electric pumps systems for the production of formation fluid in order to improve the separating properties, energy efficiency and reliability. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 779, art. 012036, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012036>
- [9] Trulev A., Kayuda M., Timushev S. et al. Conceptual features for improving the flow part of the multiphase stages of ESP submersible plants for small and medium feeds for extracting stratal liquid with a high free gas content. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 779, art. 012042, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012042>
- [10] Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefti* [Borehole oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2003. 816 p. (In Russ.).
- [11] Trulev A.V., Zhukova T.V., Kagiroy R.A. et al. [Study on a new way of operation of submersible unit with downhole separator of mechanical impurities]. *Rossiyskaya otraslevaya energeticheskaya konferenciya* [Russian Industry Energy Conference]. URL: https://libgeo.ru/library/roek?product_id=25411&filter=303 (accessed: 21.02.2025). (In Russ.).
- [12] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical study of the performance loss of a centrifugal pump carrying emulsion. *E3S Web Conf.*, 2021, vol. 321, art. 01010, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132101010>

- [13] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical assessment of the hydrodynamic behavior of a volute centrifugal pump handling emulsion. *Entropy*, 2022, vol. 24, no. 2, art. 221, doi: <https://doi.org/10.3390/e24020221>
- [14] Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O. et al. Improving flow path of the cyclone-type desanders using the multiphase coefficient of the discrete particles relative speed. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 7, pp. 93–106, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-93-106> (In Russ.).
- [15] Banjar H., Zhang H.Q. Experiments and emulsion rheology modeling in an electric submersible pump. *Proc. Int. Petroleum Technology Conf.*, 2019, art. IPTC-19463-MS, doi: <https://doi.org/10.2523/iptc-19463-ms>
- [16] Zharkovskii A., Svoboda D., Borshchev I. et al. Axial-flow pump with enhanced cavitation erosion resistance. *Energies*, 2023, vol. 16, art. 1344, doi: <https://doi.org/10.3390/en16031344>
- [17] Anpina N.A., Kaplan A.L., Peshcherenko S.N. Submersible separators for solids management. *Burenie i neft*, 2011, no. 12, pp. 40–43. (In Russ.).
- [18] Sabirov A.A. Bench tests of downhole separators of mechanical impurities. *Inzhenernaya praktika*, 2011, no. 5, pp. 150–155. (In Russ.).
- [19] Sabirov A.A., Bulat A.V., Zuev A.S. et al. Refinement of the bench testing methodology for downhole separators of mechanical impurities. *Territoriya neftegaz*, 2011, no. 2, pp. 22–25.
- [20] Bulat A.V. *Povyshenie effektivnosti raboty skvazhinного nasosного oborudovaniya za schet primeneniya separatorov mekhanicheskikh primesey*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing efficiency of downhole pumping equipment through the use of mechanical impurities separators. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2013. 139 p. (In Russ.).
- [21] Anpina N.A., Peshcherenko S.N. Mathematical modeling of solid particles motion in submersible separators. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics], 2012, no. 2, pp. 62–68. (In Russ.).
- [22] Novokreshchennykh D.V. [Evaluation of the effectiveness of the use of separators of mechanical impurities]. *Mat. konf. Ekspluatatsiya oslozhnennogo fonda skvazhin* [Proc. Conf. Operation of the Complicated fund of Wells]. Surgut, 2022. (In Russ.).
- [23] Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Bulat A.V. et al. Stend dlya provedeniya ispytaniy skvazhinnykh gazopesochnykh separatorov [Stand for testing of borehold gas and sand separators]. Patent RU 124497. Appl. 08.08.2012, publ. 27.01.2013. (In Russ.).
- [24] Trulev A.V., Zhukov T.Yu. Method for testing separator of mechanical impurities — gas phase enlarger, and test bench for its implementation (versions). Patent RU 2825819. Appl. 27.02.2024, publ. 30.08.2024. (In Russ.).
- [25] Soo S. *Fluid dynamics of multiphase systems*. Blaisdell, 1967. 524 p. (Russ. ed.: *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem*. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.)
- [26] Lyapkov P.D. Movement of a spherical particle relative to the liquid in the inter-blade channel of a centrifugal pump impeller. *Trudy MINKh i GP*, 1977, no. 129, pp. 3–36. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13. 03.2025

Информация об авторах

ТРУЛЕВ Алексей Владимирович — кандидат технических наук, инженер, Научно-учебный комплекс «Энергомашиностроение», лаборатория «Лопастные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, д. 2, e-mail: a.trulev@yandex.ru).

ТИМУШЕВ Сергей Федорович — доктор технических наук, профессор кафедры 202. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: irico.harmony@gmail.com).

ЛОМАКИН Владимир Олегович — доктор технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: lomakin@bmstu.ru).

КЛИПОВ Александр Валерьевич — руководитель направления по разработке насосной техники. ООО «Римера-Алнас» (423450, Альметьевск, Российская Федерация, ул. Сургутская, д. 2, e-mail: Aleksandr.Klipov@rimera.com).

ЖУКОВА Татьяна Витальевна — ведущий инженер-конструктор отдела разработки насосной техники. ООО «Римера-Алнас» (423450, Альметьевск, Российская Федерация, ул. Сургутская, д. 2, e-mail: Tatyana.Zhukova@rimera.com).

КАГИРОВ Рамиль Азгарович — начальник отдела разработки насосной техники. ООО «Римера-Алнас» (423450, Альметьевск, Российская Федерация, ул. Сургутская, д. 2, e-mail: Ramil.Kagirov@rimera.com).

Information about the authors

TRULEV Aleksey Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Engineer, Scientific and educational complex "Power engineering", Laboratory "Blade machines". Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a.trulev@yandex.ru).

TIMUSHEV Sergey Fedorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor Department of 202. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: irico.harmony@gmail.com).

LOMAKIN Vladimir Olegovich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Fluid Mechanics, Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: lomakin@bmstu.ru).

KLIPOV Aleksandr Valeryevich — Head of the Department of Pumping Equipment Development. Rimera-Alnas LLC (423450, Almet'yevsk, Tatarstan, Russian Federation, Surgutskaya St., Bldg. 2, e-mail: Aleksandr.Klipov@rimera.com).

ZHUKOVA Tatyana Vitalievna — Leading Design Engineer, Department of Pumping Equipment Development. Rimera-Alnas LLC (423450, Almet'yevsk, Tatarstan, Russian Federation, Surgutskaya St., Bldg. 2, e-mail: Tatyana.Zhukova@rimera.com).

KAGIROV Ramil Azgarovich — Head of the Department of Pumping Equipment Development. Rimera-Alnas LLC (423450, Almet'yevsk, Tatarstan, Russian Federation, Surgutskaya St., Bldg. 2, e-mail: Ramil.Kagirov@rimera.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Ломакин В.О., Клипов А.В., Жукова Т.В., Кагиров Р.А. Расчет основных элементов проточной части десендеров циклонного типа с использованием локального мультифазного коэффициента сепарации. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 7, с. 63–74.

Please cite this article in English as:

Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O., Klipov A.V., Zhukova T.V., Kagirov R.A. Computing main elements of a cyclone-type desender flow part using the local multiphase separation coefficient. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 7, pp. 63–74.