

УДК 622.323; 621.6.078

Расчет проточной части мультифазных ступеней с использованием мультифазных коэффициентов

А.В. Трулев¹, С.Ф. Тимушев², В.О. Ломакин³,
Е.М. Шмидт¹, А.В. Клипов¹

¹ ООО «Римера-Алнас»

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

³ МГТУ им Н.Э. Баумана

Computation of the multiphase stage flow path using the multiphase coefficients

A.V. Trulev¹, S.F. Timushev², V.O. Lomakin³,
E.M. Schmidt¹, A.V. Klipov¹

¹ Rimeria-Alnas LLC

² Moscow Aviation Institute (National Research University)

³ Bauman Moscow State Technical University

Выведены уточненные выражения для расчета локального коэффициента быстроходности и локальных мультифазных коэффициентов быстроходности и сепарации для лопастных гидромашин, работающих на мультифазных смесях. Эти коэффициенты, определенные для элементов проточной части гидромашин, работающей на чистой жидкости без газа, использованы в методике расчета. Локальный мультифазный коэффициент сепарации с учетом физико-химических свойств — относительная скорость проскальзывания при движении одиночного пузырька свободного газа диаметром 130 мкм в проточной части лопастной гидромашин, причем наличие одиночного пузырька не меняет напорную и энергетическую характеристики. Этот коэффициент носит вспомогательный и информативный характер. Предложен алгоритм расчета, составляющий основу методики, которая позволяет на основе локальных мультифазных коэффициентов оценить эффективность проточной части исходя из заданных параметров работы и определить ее основные геометрические размеры.

EDN: TOTAPS, <https://elibrary/totaps>

Ключевые слова: мультифазная ступень, газожидкостная смесь, проточная часть, локальный коэффициент быстроходности, локальный мультифазный коэффициент быстроходности

The paper presents the derived refined expressions for computing the local speed coefficient and the local multiphase speed and separation coefficients for the blade hydraulic machines operating on the multiphase mixtures. These coefficients are determined for the flow path elements of a hydraulic machine operating on pure liquid without gas, and are applied in the computation methodology. The local multiphase separation coefficient, taking into account the physicochemical properties, is the relative slip velocity of a single free gas bubble with the diameter of 130 μm motion in the flow path of a blade hydraulic machine. Presence of a single bubble is not changing the pressure and energy characteristics. This coefficient is of the auxiliary informative nature. The paper proposes a computation algorithm forming the basis of a methodology that makes it possible to assess the flow path efficiency based on the local multiphase coefficients and on the specified operating parameters, as well as to determine its main geometric dimensions.

EDN: TOTAPS, <https://elibrary/totaps>

Keywords: multiphase stage, gas-liquid mixture, flow path, local speed coefficient, local multiphase speed coefficient

Для повышения коэффициента извлечения нефти снижают забойное давление, вследствие чего увеличивается содержание свободного газа и механических примесей на входе в электрический центробежный насос (ЭЦН) [1–4].

Совершенствованию оборудования для эффективной добычи пластовой жидкости в условиях высокого содержания механических примесей и свободного газа посвящены работы [5–14].

При высоком содержании свободного газа на входе в погружную установку ЭЦН подача и развиваемое давление деградируют. Работа ЭЦН характеризуется колебаниями подачи, давления рабочей жидкости (РЖ) и мощности, которые приводят к повышению вибрации и снижению эффективности ступени. При увеличении содержания свободного газа возникают газовые пробки и срыв подачи ЭЦН [3, 15].

Эффективность погружной установки ЭЦН при высоком содержании свободного газа повышают различными способами [3]: установкой на входе в ЭЦН газосепаратора, отделяющего большую часть свободного газа, направляющего отделенный газ в затрубное пространство и дегазированную пластовую жидкость в ЭЦН [10]; использованием предвключенного модуля — диспергатора, ступени которого позволяют измельчать пузырьки газожидкостной смеси (ГЖС), «конического насоса», состоящего из пакетов ступеней на разные подачи; применением входных модулей с мультифазными ступенями.

Для разработки перечисленных лопастных гидромашин требуется не только интегральная оценка работы ступени, но и анализ функционирования локальных элементов, отдельных узлов и даже отдельных характерных участков проточной части ступени.

Результаты исследования течения потока мультифазной смеси (МФС) приведены в работах [9, 16–20]. Вопросы течения потока в лопастных решетках рассмотрены в публикациях [21–24].

Цель работы — вывод выражений для определения мультифазных коэффициентов и разработка на их основе методики расчета геомет-

рических характеристик проточной части лопастной ступени для работы на МФС.

Модель РЖ. В качестве модели РЖ для вывода всех коэффициентов выбрана чистая жидкость без газа.

Погружные установки в скважинах, добывающих пластовую жидкость, при условии, что допускаемое содержание свободного газа не превышает заданного значения, работают на квазигомогенной мелкодисперсной ГЖС, где отсутствуют крупные газовые каверны.

Допускаемое содержание свободного газа зависит от дисперсности ГЖС и среднего диаметра пузырьков, определяемого давлением на входе в насос, пенистостью (которая зависит от степени обводненности пластовой жидкости), диспергирующими свойствами лопастной решетки и другими факторами [1–4, 15–18].

При работе на ГЖС происходит снижение напорной характеристики ЭЦН, так как скорость движения пузырьков свободного газа меньше скорости течения жидкой фазы. Вызванное этим увеличение скорости течения жидкой фазы приводит к снижению теоретического напора ЭЦН.

Учитывая, что на входе в многоступенчатый ЭЦН (с числом ступеней около 500...600 шт.), давление, как правило, составляет около 5 МПа (50 атм), пренебрегаем сжимаемостью ГЖС в пределах одной ступени.

Выведенные коэффициенты также можно рассчитать для ГЖС. В этом случае напор можно определить путем стендовых испытаний, численным методом и пересчетом имеющихся характеристик [6–9]. Но так как это связано со значительно большими трудностями, чем определение напора на жидкости без газа, их использование носит вспомогательный и информативный характер.

Локальный коэффициент статического напора (ЛКСН). Типовая мультифазная оседагональная ступень может содержать подвод 1, осевое колесо (шнек) 2, рабочее колесо (РК) диагонального типа 3, направляющий аппарат (НА) 4 и отвод 5, как показано на рис. 1. Ло-

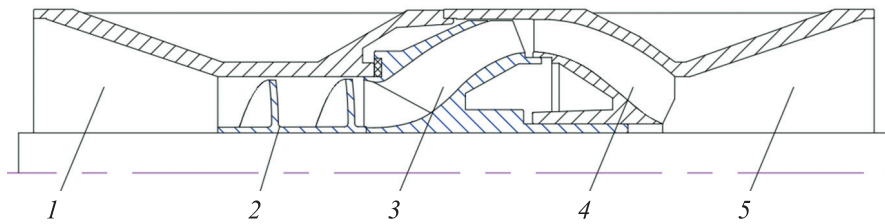


Рис. 1. Схема типовой мультифазной оседиагональной ступени

пастные решетки шнека и РК могут быть выполнены как отдельные элементы или как единая лопастная решетка. Лопасти шнека могут плавно переходить в лопасти РК. Таким образом, лопастную решетку можно условно разделить на характерные участки (ярусы).

Согласно классической теории турбомашин [25], коэффициент быстроходности вводят для лопаточной решетки РК, но условно это можно сделать для любого элемента проточной части: лопастной решетки на входе в РК, НА и отвода, учитывая изменение давления РЖ в этих элементах.

ЛКСН для каждого из элементов проточной части ступени вводят с учетом статического напора, расхода РЖ, частоты вращения ротора и характерного размера, который определяет границы локального участка.

Для локальных геометрически подобных участков проточной части лопастной ступени условием гидродинамического подобия являются равенство чисел Эйлера и кинематическое подобие:

$$\begin{cases} Eu = \frac{g\Delta H_{ст}}{(nL)^2} = idem; \\ \frac{Q}{nL^3} = idem, \end{cases} \quad (1)$$

где Eu — число Эйлера; g — ускорение свободного падения; n — частота вращения ротора; $\Delta H_{ст}$ — изменение статического напора при работе на чистой жидкости на границах элемента проточной части; L — характерный размер насоса; Q — расход РЖ.

Возведя первое уравнение в третью степень, второе во вторую, поделив и умножив на 3,65, получаем коэффициент статического напора для локального участка без учета линейных размеров

$$n_{sl} = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{\Delta H_{ст}^{3/4}}.$$

ЛКСН отличается от коэффициента быстроходности ступени тем, что вместо напора ступени использовано изменение статического напора на локальном участке, например, отдельно в РК, НА, на характерном участке РК или НА.

Для каждого элемента проточной части ступени справедливы следующие соотношения:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad (2)$$

$$\frac{\Delta H_{ст1}}{\Delta H_{ст2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad (3)$$

где индексом «1» обозначены параметры для одной частоты вращения ротора, а индексом «2» — для другой.

При изменении частоты вращения ротора коэффициент быстроходности ступени и ЛКСН для элементов проточной части остаются неизменными.

Например, при изменении частоты вращения ротора в 2 раза ЛКСН согласно выражениям (2) и (3) приобретает вид

$$\begin{aligned} n_{sl} &= \frac{2n\sqrt{2Q}}{(4\Delta H_{ст})^{3/4}} = \frac{2 \cdot 2^{1/2} n\sqrt{Q}}{2^{6/4} \Delta H_{ст}^{3/4}} = \\ &= \frac{2^{3/2} n\sqrt{Q}}{2^{3/2} \Delta H_{ст}^{3/4}} = \frac{n\sqrt{Q}}{\Delta H_{ст}^{3/4}}. \end{aligned}$$

С помощью коэффициента быстроходности ступени можно определить примерную форму проточной части.

Исходя из рекомендованных значений ЛКСН при заданных значениях расхода РЖ и частоты вращения ротора для элементов проточной части ступени — подвода, шнека, РК, НА и отвода (см. рис. 1) — определяют такие параметры на границах, как изменение давления РЖ, радиусы, углы на входе и выходе.

РК может работать с разными НА, но если при этом сохраняется геометрическое и кинематическое подобие на границах лопастной

решетки, то, соответственно, ЛКСН остается неизменным.

Относительная скорость проскальзывания (локальный мультифазный коэффициент (ЛМК) сепарации) с учетом физико-химических свойств.

Скорость движения дискретной частицы относительно скорости течения жидкой фазы [15–17]

$$\Delta v = \frac{d_d^2 (\rho_m - \rho_d)}{24\nu\rho_{\text{ж}}} a = \frac{d_d^2 (\rho_m - \rho_d)}{24\nu\rho_{\text{ж}}\rho_m} \frac{\Delta p}{\Delta S} = \frac{d_d^2 g (\rho_m - \rho_d)}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{\Delta S}.$$

Здесь d_d — диаметр и плотность дискретной частицы; ρ_m и ρ_d — плотность МФС и дискретной частицы; ν и $\rho_{\text{ж}}$ — кинематическая вязкость и плотность жидкости; a — суммарное ускорение массовых сил,

$$a = \frac{1}{\rho_m} \frac{\Delta p}{\Delta S} = g \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{\Delta S};$$

Δp — изменение давления РЖ на ΔS ; ΔS — локальное изменение длины средней линии проточной части в меридианном сечении.

Относительная скорость проскальзывания

$$k_{\text{msg}} = \frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_d^2 (\rho_m - \rho_d)}{24\nu\rho_{\text{ж}}\rho_m} \frac{\Delta p}{v_m \Delta S} = \frac{d_d^2 g (\rho_m - \rho_d)}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{\Delta H_{\text{стГЖС}}}{v_m \Delta S}, \quad (4)$$

где v_m — средняя меридиональная скорость течения модельной жидкости или МФС на локальном участке; $\Delta H_{\text{стГЖС}}$ — статический напор ЭЦН при работе на ГЖС, который меньше, чем напор ЭЦН при работе на жидкости без газа.

При работе многоступенчатых насосов на смеси вода — воздух после диспергирования на первых ступенях средний диаметр пузырьков газа не меняется и составляет около 130 мкм [1]. Ввиду постоянства этого диаметра его можно использовать при оценке работы элементов проточной части на МФС с целью проверки, что решение не выходит за определенные границы физического смысла.

При движении одиночного пузырька диаметром 130 мкм в воде плотности в уравнении (4) сокращаются, и можно записать

$$k_{\text{ms}} = \frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_d^2}{24\nu\rho_{\text{ж}}} \frac{\Delta p}{v_m \Delta S} = \frac{d_d^2 g}{24\nu} \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{v_m \Delta S}.$$

Чтобы учесть физико-химические свойства МФС, уравнение (4) для ЛМК сепарации можно представить как

$$k_{\text{ms}} = k_{\text{ф.х.с}} \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{v_m \Delta S} = k_{\text{ф.х.с}} m_s,$$

где $k_{\text{ф.х.с}}$ — коэффициент, учитывающий физико-химические свойства МФС,

$$k_{\text{ф.х.с}} = \frac{d_d^2 g (\rho_m - \rho_d)}{24\nu\rho_{\text{ж}}};$$

m_s — ЛМК сепарации без учета физико-химических свойств МФС,

$$m_s = \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{\Delta S} \frac{1}{v_m}.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta H_{\text{ст}}}{\Delta S} = m_s v_m.$$

Чтобы сохранить постоянным коэффициент сепарации, локальное изменение статического напора должно быть пропорционально средней меридиональной скорости течения потока.

Чем выше скорость течения потока или (и) ниже напорность на характерной длине, тем лучше работает участок проточной части на МФС и меньше коэффициент сепарации.

Если необходимо отсепарировать дискретную частицу, то коэффициент сепарации должен быть высоким.

Требование обеспечить определенное соотношение между градиентом давления и скоростью течения потока МФС относится ко всем элементам проточной части.

ЛМК быстроходности. Чтобы определить, как меняются ЛМК сепарации с учетом k_{ms} и без учета m_s физико-химических свойств при изменении частоты вращения ротора, следует ввести понятие ЛМК быстроходности.

Учитывая, что $L \approx S$, $L^2 \approx F$, систему уравнений (1) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{g \Delta H_{\text{ст}} / \Delta S}{n^2 L} = \text{idem}; \\ \frac{Q/F}{nL} = \text{idem}, \end{cases} \quad (5)$$

где F — площадь проточной части, соответствующая ΔS .

Поделив второе выражение в системе (5) на первое, получаем ЛМК быстроходности, выраженный через среднюю меридиональную скорость течения МФС и изменение статического напора на локальном участке проточной части,

$$n_{mv} = \frac{Q/F}{nL} \frac{n^2 L}{g \Delta H_{ст}/\Delta S} = \frac{n}{g} \frac{v_m}{\Delta H_{ст}/\Delta S} \frac{n}{g} m,$$

где m — ЛМК скорости движения дискретной частицы без учета физико-химических свойств МФС,

$$m = \frac{Q/F}{\Delta H_{ст}/\Delta S} = \frac{v_m}{\Delta H_{ст}/\Delta S}.$$

ЛМК скорости движения дискретной частицы без учета физико-химических свойств МФС и ЛМК сепарации связаны соотношением

$$m = \frac{1}{m_s}$$

Чем выше ЛМК быстроходности, тем лучше работают мультифазные ступени и хуже сепарирующие устройства. Аналогично, чем выше ЛМК сепарации, тем лучше работают сепарирующие устройства и хуже — мультифазные ступени.

По аналогии с коэффициентом быстроходности ступени и локальным коэффициентом (ЛК) быстроходности при изменении частоты вращения ротора ЛМК быстроходности остается неизменным.

Так, при увеличении частоты вращения ротора в 2 раза согласно выражениям (2) и (3) ЛМК быстроходности

$$\begin{aligned} n_{mv} &= \frac{2n}{g} \frac{2Q/F}{4\Delta H_{ст}/\Delta S} = \frac{2n}{g} \frac{2v_m}{4\Delta H_{ст}/\Delta S} = \\ &= \frac{n}{g} \frac{Q/F}{\Delta H_{ст}/\Delta S} = \frac{n}{g} \frac{v_m}{\Delta H_{ст}/\Delta S}. \end{aligned}$$

При этом ЛМК сепарации и, соответственно, относительная скорость проскальзывания

линейно зависят от частоты вращения ротора:

$$m_s = \frac{n}{gn_{mv}}.$$

Например, при повышении частоты вращения ротора в 2 раза относительная скорость проскальзывания также возрастет в 2 раза для МФС с любыми физико-химическими свойствами.

Значения ЛК и ЛМК быстроходности определяют для элементов проточной части при работе на чистой жидкости без газа. Однако эти коэффициенты задают определенное соотношение между изменением статического напора и скоростью течения потока, при котором возникает относительная скорость проскальзывания, обеспечивающая эффективную работу на МФС.

Следует отметить, что для мультифазных ступеней выведенные ЛК и коэффициент быстроходности ступени определяют при номинальном режиме работы.

Пример расчета коэффициента быстроходности при номинальной подаче РЖ приведен в работе [26], так как для тихоходных насосов напор и коэффициент полезного действия (КПД) выше, если оптимальная подача РЖ больше номинальной [27].

По аналогии для мультифазных ступеней, ступеней с хорошими кавитационными свойствами определяющим критерием для выбора режима при расчете коэффициента быстроходности является не максимальный КПД при работе на воде, а подача, при которой ЭЦН будет эксплуатироваться, высокий кавитационный запас, напор при работе на ГЖС и т. д.

Расчет проточной части мультифазных ступеней. ЛК быстроходности позволяет определить параметры на границах элемента проточной части, например, РК — перепад давления, радиусы, углы наклона лопастей на входе и выходе, а ЛМК быстроходности — изменение

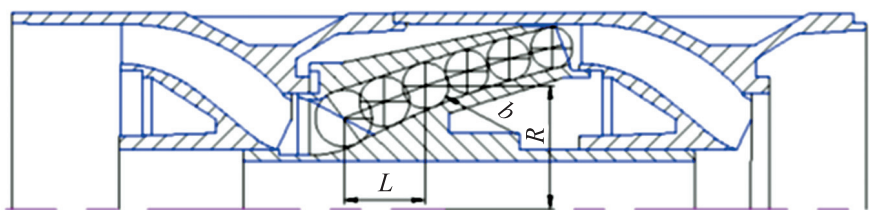


Рис. 2. Эскиз мультифазной ступени

геометрических характеристик внутри этих границ.

Расчет проточной части мультифазной ступени целесообразно проводить в следующей последовательности (рис. 2).

1. Выбираем рекомендованный для данных условий работы коэффициент быстроходности ступени, ЛК быстроходности РК. При заданных значениях частоты вращения ротора и подачи ЭЦН определяем параметры на границах ступени, РК и НА: перепад давления, радиусы входа и выхода, углы наклона лопастей (ход шнека).

2. Задаем рекомендованное значение ЛМК быстроходности и вычисляем ЛМК сепарации. Например [9], для РК $k_{ms\text{РК}} = 0,2$, для НА $k_{ms\text{НА}} = 0,10 \dots 0,15$. ЛМК сепарации позволяет выполнить детальный расчет геометрических характеристик проточной части внутри ранее определенных по п. 1 граничных значений, которые обеспечивают требуемое соотношение между скоростью течения потока, помогающей пузырькам свободного газа проходить через проточную часть, и градиентом давления, который препятствует этому. В результате обеспечивается движение дискретных частиц в проточной части с определенной относительной скоростью проскальзывания.

3. При заданной средней меридиональной скорости течения МФС определяем изменение длины средней линии проточной части лопастной решетки для РК $\Delta L_{m\text{РК}}$ и НА $\Delta L_{m\text{НА}}$:

$$\Delta L_{m\text{РК}} = k_{\text{ф.х.с}} \frac{\Delta H_{\text{стРК}}}{v_{m\text{РК}} k_{ms\text{РК}}};$$

$$\Delta L_{m\text{НА}} = k_{\text{ф.х.с}} \frac{\Delta H_{\text{стНА}}}{v_{m\text{РК}} k_{ms\text{НА}}}.$$

При заданной длине вычисляем меридиональную скорость течения потока и ширину проточной части.

4. Разделяем длину средней линии меридионального сечения лопастной решетки L_m на $n_{\text{ц}}$ частей:

$$\Delta L_m = \frac{L_m}{n_{\text{ц}}}.$$

5. Методом итераций для каждой части $\Delta L_{mi} = L_m n_i / n$ ($i = 1, \dots, n_{\text{ц}}$) определяем радиус средней линии относительно оси вращения R_i , ход шнека S_i (углы наклона лопастей), ширину меридианного сечения b_i и изменение длины ступени ΔL_i . При этих параметрах обеспечива-

ется постоянная относительная скорость проскальзывания:

$$\begin{cases} u_i = \omega R_i; \\ v_{mi} = v_{m1} + k_{vm} \Delta L_{mi}; \\ S_i = S_1 + k_s \Delta L_{mi}; \\ v_{ui} = k_{\text{к.ч.л}} \left(u_i - v_m \frac{2\pi R_i}{S_i} \right); \\ \Delta H_{\text{стРК } i} = \frac{\eta_r}{g} \left(v_{ui} u_i - \frac{v_{ui}^2}{2} \right); \\ k_{msi} = k_{\text{ф.х.с}} \frac{H_{\text{стРК } i} - H_{\text{стРК } i-1}}{\Delta L_{mi}} \frac{1}{v_{mi}}; \\ b_i = \frac{Q}{2\pi R_i v_m}; \\ L_i = \sqrt{\Delta L_m^2 - (R_i - R_{i-1})^2}; \\ \Delta L_i = \Delta L_{i-1} + L_i, \end{cases} \quad (6)$$

где u_i — окружная скорость течения потока; ω — угловая скорость вращения ротора; k_{vm} — коэффициент, учитывающий изменение меридиональной скорости от входа к выходу; $k_{\text{к.ч.л}}$ — коэффициент, учитывающий конечное число лопастей в РК; η_r — гидравлический КПД.

Вывод уравнений системы (6) приведен в работе [9]. Два из трех параметров (радиус средней линии относительно оси вращения R_i , ход шнека S_i (углы наклона лопастей) и ширина меридианного сечения b_i) задают изначально. Например, S_i и b_i задают из условия равномерного изменения между ранее определенными параметрами на границах участка проточной части S_1, b_1 и S_2, b_2 , а значение R_i , обеспечивающее постоянство величины k_{msi} , вычисляют методом итераций.

6. Используя, полученные данные определяем детальное изменение геометрических характеристик проточной части, обеспечивающих движение МФС с заданной относительной скоростью проскальзывания.

Приведенный алгоритм расчета составляет основу методологии, которая позволяет на основе ЛМК при известных геометрических характеристиках проточной части оценить ее эффективность при работе на МФС исходя из заданных параметров и определить основные геометрические размеры проточной части.

Выводы

1. Выполнен уточненный вывод коэффициентов, которые можно использовать при расче-

те лопастных гидромашин, работающих на МФС: ЛК быстроходности, ЛМК быстроходности и ЛМК сепарации.

2. Предложен алгоритм расчета, составляющий основу методологии, позволяющей на ос-

нове ЛМК при известных геометрических характеристиках проточной части оценить ее эффективность при работе на МФС исходя из заданных параметров и определить основные геометрические размеры проточной части.

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] Вахитова Р.И., Сарачева Д.А., Уразаков Д.Р. и др. *Повышение эффективности работы погружных электроцентробежных установок при добыче нефти с высоким газосодержанием*. Альметьевск, АГНИ, 2019. 104 с.
- [5] Трулев А.В., Логинов В.Ф., Горбунов С.И. и др. Разработка и опытно-промышленное внедрение погружных УЭЦН концептуально новой конструкции для эксплуатации малодебитных 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] Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Шмидт Е.М. Особенности стендовых испытаний газосепараторов установок погружных электроцентробежных насосов для добычи нефти. *Нефть. Газ. Новации*, 2020, № 7, с. 62–69.
- [7] Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Ломакин В.О. Концептуальные особенности методики стендовых испытаний газосепараторов установок погружных электроцентробежных насосов для добычи нефти. *Насосы. Турбины. Системы*, 2020, № 2, с. 11–27.
- [8] Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Ломакин В.О. и др. Проблемы разработки месторождений тяжелых нефтей со сложными геологическими условиями и пути их решения. *Нефть. Газ. Новации*, 2020, № 2, с. 55–60.
- [9] Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Ломакин В.О. и др. Совершенствование проточной части мультифазных ступеней с использованием мультифазного коэффициента относительной скорости движения дискретных частиц. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 72–87, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-9-72-87>
- [10] Мусинский А.Н. *Разработка и исследование вихревых газосепараторов для высокодебитных скважин*. Дисс. ... канд. тех. наук. Пермь, ПНИПУ, 2021. 172 с.
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] Cheremushkin V., Lomakin V., Kalin N. et al. Development and research of a borehole centrifugal pump stage. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 779, art. 012055, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012055>

- [15] Ляпков П.Д. Движение сферической частицы относительно жидкости в межлопаточном канале рабочего колеса центробежного насоса. *Труды МИНХ и ГП*, 1977, № 129, с. 3–36.
- [16] Соу С. *Гидродинамика многофазных систем*. Москва, Мир, 1971. 536 с.
- [17] Мищенко И.Т. *Скважинная добыча нефти*. Москва, Нефть и газ, 2003. 816 с.
- [18] Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. *Гидравлика газожидкостных систем*. Москва-Ленинград, Госэнергоиздат, 1958. 232 с.
- [19] Подвидз Л.Г., ред. *Методическое пособие по расчету шнеко-центробежной ступени насоса*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана. 1975. 64 с.
- [20] Ломакин В.О., Петров А.И., Кулешова М.С. Исследование двухфазного течения в осе-центробежном колесе методами гидродинамического моделирования. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 9. EDN: TDPOJT
- [21] Lomakin V.O., Kuleshova M.S., Bozh'eva S.M. Numerical modeling of liquid flow in a pump station. *Power Technol. Eng.*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 324–327, doi: <https://doi.org/10.1007/s10749-016-0623-9>
- [22] Lomakin V.O., Kuleshova M.S., Kraeva E.A. Fluid flow in the throttle channel in the presence of cavitation. *Procedia Eng.*, 2015, vol. 106, pp. 27–35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.005>
- [23] Gousskov A.M., Lomakin V.O., Banin E.P. et al. Minimization of hemolysis and improvement of the hydrodynamic efficiency of a circulatory support pump by optimizing the pump flowpath. *Biomed. Eng.*, 2017, vol. 51, pp. 229–233, doi: <https://doi.org/10.1007/s10527-017-9720-9>
- [24] Zharkovskii A., Svoboda D., Borshchev I. et al. Axial-flow pump with enhanced cavitation erosion resistance. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 3, art. 1344, doi: <https://doi.org/10.3390/en16031344>
- [25] Пфлейдерер К. *Лопаточные машины для жидкостей и газов*. Москва, Машгиз, 1960. 683 с.
- [26] Овсянников Б.В., Чебоевский В.Ф. *Высокооборотные лопаточные насосы*. Москва, Машиностроение, 1975. 336 с.
- [27] Шерстюк А.Н., Мешалкин С.М., Трулев А.В. и др. Выбор расчетного режима работы ступени погружного нефтяного насоса. *Химическое и нефтяное машиностроение*, 2003, № 8, с. 29–30.

References

- [1] Drozdov A.N. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefti pogruzhnymi 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 pogruzhnymi 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 primeneniye* [Russian installations of vane pumps for oil production and their application]. Perm, Press-Master Publ., 2007. 645 p. (In Russ.).
- [4] Vakhitova R.I., Saracheva D.A., Urazakov D.R. et al. *Povyshenie effektivnosti raboty pogruzhnykh elektrotsentrobezhnykh ustanovok pri dobyche nefti s vysokim gazosoderzhaniem* [Improving the efficiency of submersible electric centrifugal units in oil production with high gas content.]. Almet'yevsk, AGNI Publ., 2019. 104 p. (In Russ.).
- [5] Trulev A.V., Loginov V.F., Gorbunov S.I. et al. *Razrabotka i opytно-promyshlennoe vnedreniye pogruzhnykh UETsN kontseptualno novoy konstruktssii 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 de-

- velopment of fuel and energy and extractive industry]. Moscow, Format Publ., 2019, pp. 307–310. (In Russ.).
- [6] Trulev A.V., Timushev S.F., Shmidt E.M. Features of ESP gas separator bench tests for oil production purposes. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2020, no. 7, pp. 62–69. (In Russ.).
- [7] Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O. Conceptual features of the method of bench testing of gas separators for submersible electric centrifugal pumps for oil production. *Nasosy. Turbiny. Sistemy* [Pumps. Turbines. Systems], 2020, no. 2, pp. 11–27. (In Russ.).
- [8] Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O. et al. Problems and ways to solve the development of heavy oil fields with complex geological conditions. *Neft. Gaz. Novatsii*, 2020, no. 2, pp. 55–60. (In Russ.).
- [9] Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O. et al. Improving the multiphase stages flow path using the multiphase coefficient of the discrete particles relative speed. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 9, pp. 72–87, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2023-9-72-87> (in Russ.).
- [10] 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.).
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] Cheremushkin V., Lomakin V., Kalin N. et al. Development and research of a borehole centrifugal pump stage. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 779, art. 012055, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012055>
- [15] 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.).
- [16] Soo S. *Fluid dynamics of multiphase systems*. Blaisdell, 1967. 524 p. (Russ. ed.: *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem*. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.)
- [17] Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefti* [Borehole oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2003. 816 p. (In Russ.).
- [18] Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidravlika gazozhidkostnykh sistem* [Hydraulics of gas-liquid systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. 232 p. (In Russ.).
- [19] Podvidz L.G., ed. *Metodicheskoe posobie po raschetu shneko-tsentrobezhnay stupeni nasosa* [Methodical guide for calculation of screw-centrifugal pump stage]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1975. 64 p. (In Russ.).
- [20] Lomakin V.O., Petrov A.I., Kuleshova M.S. Investigation of two-phase flow in axial-centrifugal impeller by hydrodynamic modeling methods. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2014, no. 9. EDN: TDPOJT (In Russ.).
- [21] Lomakin V.O., Kuleshova M.S., Bozh'eva S.M. Numerical modeling of liquid flow in a pump station. *Power Technol. Eng.*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 324–327, doi: <https://doi.org/10.1007/s10749-016-0623-9>
- [22] Lomakin V.O., Kuleshova M.S., Kraeva E.A. Fluid flow in the throttle channel in the presence of cavitation. *Procedia Eng.*, 2015, vol. 106, pp. 27–35, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.005>
- [23] Gousskov A.M., Lomakin V.O., Banin E.P. et al. Minimization of hemolysis and improvement of the hydrodynamic efficiency of a circulatory support pump by optimizing the

- pump flowpath. *Biomed. Eng.*, 2017, vol. 51, pp. 229–233, doi: <https://doi.org/10.1007/s10527-017-9720-9>
- [24] Zharkovskii A., Svoboda D., Borshchev I. et al. Axial-flow pump with enhanced cavitation erosion resistance. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 3, art. 1344, doi: <https://doi.org/10.3390/en16031344>
- [25] Pfleiderer C. *Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase*. Springer, 1961. 622 p. (Russ. ed.: *Lopatochnye mashiny dlya zhidkostey i gazov*. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 683 p.)
- [26] Ovsyannikov B.V., Cheboevskiy V.F. *Vysokooborotnye lopatochnye nasosy* [High-speed vane pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 336 p. (In Russ.).
- [27] Sherstyuk A.N., Meshalkin S.M., Trulev A.V. et al. Selection of the design mode of operation of a stage of a submersible oil pump. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie*, 2003, no. 8, pp. 29–30. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 12.03.2025

Информация об авторах

ТРУЛЕВ Алексей Владимирович — кандидат технических наук, главный инженер-исследователь, инженерно-исследовательское управление, отдел исследований. ООО «Римера-Алнас» (423450, Альметьевск, Российская Федерация, Сургутская ул., д. 2, e-mail: aleksey.trulev@rimera.com).

ТИМУШЕВ Сергей Федорович — доктор технических наук, профессор. 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, заведующий кафедрой «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: lomakin@bmstu.ru).

ШМИДТ Евгений Мстиславович — начальник инженерно-исследовательского управления. ООО «Римера-Алнас» (423450, Альметьевск, Сургутская ул., д. 2, e-mail: Evgeniy.Shmidt@rimera.com).

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

Information about the authors

TRULEV Aleksey Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Chief Research Engineer, Department of Engineering and Research. Rimera-Alnas LLC (423450, Almet'yevsk, Russian Federation, Surgutskaya St., Bldg. 2, e-mail: aleksey.trulev@rimera.com).

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

LOMAKIN Vladimir Olegovich — Doctor of Science (Eng.), Head of the 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).

SHMIDT Evgeniy Mstislavovich — Head of the Department of Engineering and Research. Rimera-Alnas LLC (423450, Almet'yevsk, Russian Federation, Surgutskaya St., Bldg. 2, e-mail: Evgeniy.Shmidt@rimera.com).

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

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Трулев А.В., Тимусhev С.Ф., Ломакин В.О., Шмидт Е.М., Клипов А.В. Расчет проточной части мультифазных ступеней с использованием мультифазных коэффициентов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 5, с. 93–102.

Please cite this article in English as:

Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O., Schmidt E.M., Klipov A.V. Computation of the multiphase stage flow path using the multiphase coefficients. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 5, pp. 93–102.