

УДК 622.323, 621.6.078

Влияние локального мультифазного коэффициента сепарации и содержания свободного газа на напор ступени при работе на газожидкостной смеси

А.В. Трулев¹, С.Ф. Тимушев²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

The effect of the local multiphase separation coefficient and free gas content on static head when operating on a gas-liquid mixture

A.V. Trulev¹, S.F. Timushev²¹ Bauman Moscow State Technical University² Moscow Aviation Institute (National Research University)

Выведены уравнения, позволяющие оценить при заданных для проточной части рабочего колеса локальных мультифазных коэффициентах изменение напора и давления, которые развивают мультифазные лопастные ступени при работе на газожидкостной смеси, скорости движения жидкой и газообразной фаз и занимаемые ими площади в зависимости от физико-химических свойств рабочей жидкости, включая диаметр дискретных частиц и содержание свободного газа. На примере расчета осевой мультифазной ступени с заданными для шнекового рабочего колеса локальными мультифазными коэффициентами сепарации показано, что содержание свободного газа в газожидкостной смеси оказывает незначительное влияние на напор ступени, а диаметр пузырьков свободного газа — значительное. Содержание свободного газа существенно влияет на перепад давления, создаваемого ступенью. Показано, что при стремлении отношения скорости проскальзывания газовой фазы к скорости течения жидкой фазы к единице образуется газовая пробка, относительная площадь, занимаемая газообразной фазой, стремится к единице, газ полностью перекрывает проточную часть мультифазной ступени, и рабочее колесо перестает создавать напор и давление.

EDN: EALCRH, <https://elibrary/ealcrh>

Ключевые слова: осевые мультифазные ступени, газожидкостная смесь, локальный мультифазный коэффициент, мультифазный коэффициент подобия, относительная скорость проскальзывания, локальный коэффициент статического напора

Equations are derived that make it possible to estimate, at local multiphase coefficients specified for the flow part of the impeller, the change in head and pressure that multiphase blade stages develop when working on a gas-liquid mixture, the speed of liquid and gas phases and the areas occupied by them depending on the physico-chemical properties of the fluid, including the diameter of discrete particles, the content of free gas. Using the example of calculation an axial multiphase stage with local multiphase separation coefficient for the screw impeller, it is shown that the free gas content in the gas-liquid mixture has a negligible effect on the head of the stage, and the diameter of the free gas bubbles is significant. The

free gas content has a significant effect on the pressure created by the stage. It is shown that when the ratio of the gas phase slip rate to the liquid phase flow rate tends to unity, a gas plug forms, the relative area occupied by the gaseous phase tends to unity, the gas completely blocks the flow part of the multiphase stage, and the impeller ceases to create pressure and pressure.

EDN: EALCRH, <https://elibrary/ealcrh>

Keywords: axial multiphase stages, gas-liquid mixture, local multiphase coefficient, multiphase similarity coefficient, relative slip rate, local static head coefficient

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

Оборудование для эффективной добычи пластовой жидкости в условиях высокого содержания механических примесей и СГ описано в статьях [5–15].

При высоком содержании СГ на входе в погружную установку ЭЦН подача и развиваемое давление заметно деградируют. Работа ЭЦН становится неустойчивой и характеризуется колебаниями подачи, давления рабочей жидкости (РЖ) и мощности. Колебания параметров ЭЦН приводят к повышению вибрации и, соответственно, к низким наработкам. При дальнейшем возрастании содержания СГ в пластовой жидкости возникают газовые пробки и срыв подачи ЭЦН [3, 16].

В настоящее время существуют лопастные мультифазные ступени различного конструктивного исполнения — центробежные, диагональные, оседиагональные и осевые. Применяются диспергаторы, установленные на входе в ЭЦН, ступени которых позволяют измельчать пузырьки газожидкостной смеси (ГЖС), конические насосы, состоящие из пакетов ступеней на разные подачи ГЖС.

Исследованию причин, приводящих к относительному снижению напора лопастных мультифазных ступеней при работе на ГЖС, и поиску возможностей по совершенствованию конструкций посвящены работы [16–22].

Вопросы течения потока ГЖС в лопастных решетках рассмотрены в публикациях [9–14, 23–25].

Результаты исследования течения жидкой и мультифазной сред численными методами приведены в статьях [23–26].

Цель работы — проанализировать причины, приводящие к снижению напора лопастных мультифазных ступеней при работе на ГЖС относительно их напора при работе на жидко-

сти без СГ на примере осевой ступени, а также вывести уравнения, позволяющие при заданном для проточной части локальном мультифазном коэффициенте (ЛМК) сепарации оценивать изменение напорных характеристик ступени и основных параметров ГЖС.

Модель РЖ. В качестве модели РЖ будем рассматривать квазигомогенную мелкодисперсную ГЖС. Принимаем, что в проточной части лопастных гидромашин отсутствуют газовые каверны, по крайней мере, в рабочей области. В таких условиях, как правило, работают погружные установки в скважинах, добывающих пластовую жидкость, при условии, что допускаемое в ней содержание СГ не превышает заданного значения [1–4, 16–19].

Сжимаемостью ГЖС в пределах одной ступени пренебрегаем, так как на входе в многоступенчатый ЭЦН, содержащий около 500... 600 ступеней, давление РЖ обычно составляет около 50 атм (~5 МПа), изменение давления в ступени — менее 1 %.

Мультифазные коэффициенты. *Критерий работоспособности. ЛМК сепарации — расчетная относительная скорость проскальзывания одиночного пузырька на локальном участке проточной части.* В силу многофакторности процессов затруднительно исследовать работу лопастных гидромашин на ГЖС. Однозначно можно оценить их работу на воде, сделать расчет относительной скорости проскальзывания одиночного пузырька воздуха диаметром 130 мкм на локальном участке проточной части. Диаметр 130 мкм выбран исходя из того, что это средний диаметр пузырьков газа при работе погружных ступеней ЭЦН на смеси вода–воздух [1].

На основе анализа проточных частей лучших мультифазных ступеней осевого и диагонального типа выявлено, что ЛМК сепарации составляет 0,22. Для центробежных ступеней ЛМК сепарации имеет более высокое значение.

Соответственно, при работе на РЖ с другими физико-химическими свойствами (ФХС) параметры выбирают из выражения для рекомендованного значения ЛМК сепарации:

$$k_{ms} = \frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_r^2 g}{24v_{ж}} \frac{\Delta H_{ст}}{v_m \Delta S} = \frac{d_r^2}{24v_{ж} \rho_{ж}} \frac{\Delta p}{v_m \Delta S} = k_{ФХСв} m_s \approx 0,22, \quad (1)$$

где Δv — скорость проскальзывания пузырька диаметром d_r относительно жидкой фазы (ЖФ); v_m — среднее значение меридианной скорости потока мультифазной смеси; g — ускорение от силы тяжести; $\Delta H_{ст}$ и Δp — изменение статического напора и давления на локальном участке длиной ΔS ; $v_{ж}$ и $\rho_{ж}$ — вязкость и плотность жидкости; $k_{ФХСв}$ — коэффициент, определяющий ФХС воды с пузырьком диаметром 130 мкм,

$$k_{ФХСв} = \frac{d_r^2 g}{24v_{ж}} = 6,9 \cdot 10^{-3};$$

m_s — ЛМК сепарации без учета ФХС — соотношение изменения статического напора на локальном участке, длины локального участка и средней скорости течения РЖ,

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

При изменении частоты вращения ротора и ФХС можно сделать перерасчет ЛМК сепарации

$$k_{ms2} = \frac{k_{ФХСв2} n_2}{k_{ФХСв1} n_1} k_{ms1},$$

где k_{ms2} , k_{ms1} и $k_{ФХСв2}$, $k_{ФХСв1}$ — ЛМК сепарации без учета ФХС и с учетом ФХС для нового и начального режимов работы соответственно; n_2 и n_1 — частоты вращения ротора для нового и начального режимов работы.

Недостатком формулы (1) является то, что в ее состав явно не входит частота вращения ротора.

Значения относительной скорости проскальзывания, напор и давление в элементах ступени корректно рассчитывать для модельных ГЖС без учета взаимодействия пузырьков, коалесценции, сепарации в поперечном, радиальном направлении и т. д.

Для мультифазных ступеней, конструкция которых разработана с учетом выведенных рекомендаций, можно записать

$$\frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_r^2 g}{24v_{ж}} \frac{\Delta H_{стГЖС}}{v_m \Delta S} \frac{\rho_{ГЖС} - \rho_r}{\rho_{ж}} = \frac{d_r^2}{24v_{ж} \rho_{ж}} \frac{\rho_{ГЖС} - \rho_r}{\rho_{ГЖС}} \frac{\Delta p_{ГЖС}}{v_m \Delta S},$$

где $\rho_{ГЖС}$ — плотность ГЖС.

С учетом того, что

$$\Delta H_{стГЖС} = \frac{\Delta p}{\rho_{ГЖС} g} \text{ и } \rho_r \ll \rho_{ГЖС},$$

получаем

$$\frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_r^2 g}{24v_{ж}} \frac{\Delta H_{стГЖС}}{v_m \Delta S} \frac{\rho_{ГЖС}}{\rho_{ж}} = \frac{d_r^2}{24v_{ж} \rho_{ж}} \frac{\Delta p_{ГЖС}}{v_m \Delta S}. \quad (2)$$

В первом приближении статический напор при работе на ГЖС равен статическому напору при работе на жидкости без газа: $\Delta H_{стГЖС} \approx \Delta H_{ст}$. Соответственно, поделив уравнения (1) и (2), получаем

$$\Delta p_{ГЖС} = \frac{\rho_m}{\rho_{ж}} \Delta p.$$

ЛМК быстрходности — первый мультифазный критерий подобия — определяет геометрические параметры проточной части с определенной расчетной относительной скоростью проскальзывания одиночного пузырька, с учетом частоты вращения ротора, без учета ФХС РЖ. Чтобы определить, как изменяются ЛМК сепарации с учетом k_{ms} и без учета ФХС m_s при изменении частоты вращения ротора, выведен первый мультифазный критерий подобия.

Для локальных геометрически подобных участков проточной части лопастных ступеней условием гидродинамического подобия является кинематическое подобие, равенство чисел Эйлера Eu и Рейнольдса Re .

При $Re > 10^6$ влияние этого параметра можно не учитывать, а следовательно, записать

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

где n — частота вращения ротора, $мин^{-1}$; Q — расход РЖ; L — характерный линейный размер.

С учетом того, что $L \sim \Delta S$ и $L^2 \sim F$, систему уравнений (3) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{g \Delta H_{\text{ст}} / \Delta S}{n^2 L} = \text{idem}; \\ \frac{Q/F}{nL} = \text{idem}, \end{cases} \quad (4)$$

где F — средняя площадь проточной части, соответствующая ΔS — локальному изменению длины средней линии проточной части в меридианном сечении.

Поделив верхнее и нижнее выражения системы (4), получаем выраженный через среднюю меридиональную скорость течения мультифазной смеси и изменение статического напора на локальном участке проточной части ЛМК быстроходности

$$\begin{aligned} n_m &= \frac{Q/F}{nS} \frac{n^2 S}{g \Delta H_{\text{ст}} / \Delta S} = \frac{n}{g} \frac{Q/F}{\Delta H_{\text{ст}} / \Delta S} = \\ &= \frac{n}{g} \frac{v_m}{\Delta H_{\text{ст}} / \Delta S} = \frac{n}{g} \frac{1}{m_s}. \end{aligned} \quad (5)$$

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.

При изменении скорости вращения ротора ЛМК быстроходности n_m остается неизменным. ЛМК сепарации и, соответственно, относительная скорость проскальзывания линейно зависят от частоты вращения ротора:

$$\begin{aligned} m_s &= \frac{n}{g n_m}; \\ k_{ms} &= k_{\text{ФХСв}} m_s = k_{\text{ФХСв}} \frac{n}{g} \frac{1}{n_m} \sim d_r^2 n. \end{aligned}$$

При увеличении частоты вращения относительная скорость, как правило, уменьшается, так как возрастают градиенты скорости в лопастной решетке и, соответственно, ее диспергирующие свойства, снижающие диаметр пузырьков СГ.

Недостатком формулы (5) является то, что не определены значения изменения статического напора на локальном участке и скорость потока. Неопределенность устраняет второй мультифазный критерий подобия.

Локальный коэффициент статического напора (ЛКСН) — второй мультифазный критерий подобия — определяет рекомендованное изменение статического напора на локальном участке проточной части в номинальном ре-

жиме работы с учетом подачи и частоты вращения ротора.

Возведя первое уравнение системы (3) в третью степень, второе во вторую и поделив, получаем ЛКСН для локального участка без учета линейных размеров.

$$n_{\text{с.н.л}} = \frac{n \sqrt{Q}}{\Delta H_{\text{ст}}^{3/4}}. \quad (6)$$

ЛКСН отличается от коэффициента быстроходности ступени тем, что вместо ее напора использовано изменение статического напора на локальном участке, и ЛКСН определяется не для оптимальной подачи, а для номинальной. Если мультифазный насос работает не в оптимальном режиме, то вместо коэффициента быстроходности следует применять ЛКСН.

ЛМК быстроходности и ЛКСН объективно определяют геометрические параметры проточной части, позволяют сделать расчет напора (давления) при работе на мультифазной смеси с учетом содержания, проскальзывания и сжимаемости газообразной фазы (ГФ). При изменении частоты вращения ротора они не меняются, как и коэффициент быстроходности ступени.

Параметры, определяющие работу ступеней на ГЖС. Средняя плотность ГЖС определяется выражением

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{M_{\text{ГЖС}}}{Q_{\text{ср}}},$$

где $M_{\text{ГЖС}}$ — массовый расход ГЖС, проходящей через насос; $Q_{\text{ср}}$ — средняя интегральная подача ГЖС [1].

Без учета изменения плотности газа, которым можно пренебречь при работе мультифазной лопастной ступени малого диаметра с высоким давлением ГЖС на входе, плотность ГЖС определяется как

$$\rho_{\text{см}} = \frac{Q_{\text{Г}} \rho_{\text{Г}} + Q_{\text{Ж}} \rho_{\text{Ж}}}{Q_{\text{Г}} + Q_{\text{Ж}}},$$

где $Q_{\text{Г}}$ и $Q_{\text{Ж}}$ — расходы ГФ и ЖФ.

Теоретический напор РК при работе на ГЖС

$$H_{\text{тГЖС}} = \frac{H_{\text{Г}} Q_{\text{Г}} \rho_{\text{Г}} + H_{\text{Ж}} Q_{\text{Ж}} \rho_{\text{Ж}}}{\rho_{\text{Г}} Q_{\text{Г}} + \rho_{\text{Ж}} Q_{\text{Ж}}},$$

где $H_{\text{Г}}$ и $H_{\text{Ж}}$ — напоры ступени при работе на ГФ и ЖФ.

Эту формулу представим как

$$\begin{aligned} H_{\Gamma\Gamma\text{ЖС}} &= H_{\Gamma}\Gamma_{\text{м}} + H_{\text{ж}}(1-\Gamma_{\text{м}}) = \\ &= \frac{1}{g} \left[\Gamma_{\text{м}} \Delta(v_{u\Gamma}u) + (1-\Gamma_{\text{м}}) \Delta(v_{u\text{ж}}u) \right], \end{aligned}$$

где $\Delta(v_{u\Gamma}u)$ и $\Delta(v_{u\text{ж}}u)$ — изменение циркуляции ГФ и ЖФ в РК.

Тогда можно записать

$$\begin{aligned} H_{\Gamma\Gamma\text{ЖС}} &= \frac{1}{g} \left[\Gamma_{\text{м}} (u_2^2 - v_{2\text{м}\Gamma} u_2 \text{ctg}\beta_2) + \right. \\ &\quad \left. + (1-\Gamma_{\text{м}}) (u_2^2 - v_{2\text{м}\text{ж}} u_2 \text{ctg}\beta_2) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\Gamma_{\text{м}}$ — массовое содержание СГ в ГЖС,

$$\Gamma_{\text{м}} = \frac{Q_{\Gamma}\rho_{\Gamma}}{Q_{\Gamma}\rho_{\Gamma} + Q_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}},$$

где $v_{u\Gamma}$, $v_{u\text{ж}}$ и $v_{\text{м}\Gamma}$, $v_{\text{м}\text{ж}}$ — окружные и меридианные составляющие абсолютных скоростей движения ГФ и ЖФ соответственно; u — окружная скорость РК; u_2 — окружная скорость РК на выходе; $v_{2\text{м}\Gamma}$ и $v_{2\text{м}\text{ж}}$ — меридианные составляющие абсолютной скорости движения ГФ $v_{2\Gamma}$ и ЖФ $v_{2\text{ж}}$ на выходе из РК; β_2 — угол потока на выходе из РК.

Аналогично изменение статической составляющей теоретического напора РК определяется как сумма изменения напора ГФ $\Delta H_{\Gamma,\text{ст}\Gamma}$ и ЖФ $\Delta H_{\text{ж},\text{ст}\text{ж}}$:

$$\Delta H_{\Gamma,\text{ст}\Gamma\text{ЖС}} = \Delta H_{\Gamma,\text{ст}\Gamma} + \Delta H_{\text{ж},\text{ст}\text{ж}}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta H_{\Gamma,\text{ст}\Gamma\text{ЖС}} &= \frac{\Gamma_{\text{м}}}{g} \left(v_{2u\Gamma} u_2 - \frac{v_{2\Gamma}^2}{2} \right) + \\ &\quad + \frac{(1-\Gamma_{\text{м}})}{g} \left(v_{2u\text{ж}} u_2 - \frac{v_{2\text{ж}}^2}{2} \right). \end{aligned}$$

После преобразований получаем

$$\begin{aligned} \Delta H_{\Gamma,\text{ст}\Gamma\text{ЖС}} &= \frac{\Gamma_{\text{м}}}{2g} \left[u_2^2 - (v_{2\text{м}\Gamma} u_2 \text{ctg}\beta_2)^2 \right] + \\ &\quad + \frac{(1-\Gamma_{\text{м}})}{2g} \left[u_2^2 - (v_{2\text{м}\text{ж}} u_2 \text{ctg}\beta_2)^2 \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Статический напор определяется как разность полного и динамического напоров.

Из уравнений (7) и (8) следует, что при увеличении меридианной скорости течения потока уменьшаются окружные составляющие абсолютных скоростей движения ГФ и ЖФ, и, соответственно, статический и полный теоретические напоры ступени.

Запишем систему уравнений, определяющую течение ГЖС с учетом проскальзывания пузырьков СГ относительно ЖФ:

$$\begin{cases} Q_{\text{ж}} = f_{\text{ж}} v_{\text{м}\text{ж}}; \\ Q_{\Gamma} = f_{\Gamma} v_{\text{м}\Gamma}; \\ f = f_{\text{ж}} + f_{\Gamma}; \\ \Delta v = v_{\text{м}\text{ж}} - v_{\text{м}\Gamma}; \\ Q_{\Gamma\text{ЖС}} = Q_{\text{ж}} + Q_{\Gamma}, \end{cases}$$

где $f_{\text{ж}}$ и f_{Γ} — площади, занимаемые ГФ и ЖФ в меридиональном сечении; f — площадь меридионального сечения; $Q_{\Gamma\text{ЖС}}$ — расход ГЖС.

Меридианная составляющая абсолютной скорости движения ГФ определяется следующим образом:

- с учетом сжимаемости газа

$$v_{\text{м}\Gamma} = \left(\frac{Q_{\Gamma,\text{вх}} p_{\text{вх}}}{p} + \frac{Q_{\text{ж}}}{v_{\text{м}\text{ж}}} v_{\text{м}\Gamma} \right) \frac{1}{f};$$

- без учета сжимаемости газа

$$v_{\text{м}\Gamma} = \left(Q_{\Gamma} + \frac{Q_{\text{ж}}}{v_{\text{м}\text{ж}}} v_{\text{м}\Gamma} \right) \frac{1}{f},$$

где $Q_{\Gamma,\text{вх}}$ — расход газа на входе в РК; $p_{\text{вх}}$ — давление ГЖС на входе в РК; p — давление ГЖС в РК.

После преобразований с использованием системы уравнений и выражения

$$\Delta v = v_{\text{м}} k_{\text{msg}}$$

получаем формулы для определения скоростей движения ЖФ и ГФ с учетом относительной скорости проскальзывания пузырьков СГ для ГЖС с заданными ФХС

$$\begin{cases} v_{\text{м}\Gamma} = \frac{1}{2f} \left[(Q_{\text{см}} - f\Delta v) + \sqrt{(Q_{\text{см}} - f\Delta v)^2 + 4fQ_{\Gamma}\Delta v} \right]; \\ v_{\text{м}\text{ж}} = v_{\text{м}\Gamma} + \Delta v; \\ \Delta v = v_{\text{м}} k_{\text{msg}} = \frac{d_{\Gamma}^2 g (\rho_{\Gamma\text{ЖС}} - \rho_{\Gamma}) \Delta H_{\Gamma\text{ст}\Gamma\text{ЖС}}}{24\nu\rho_{\text{ж}} \Delta S}. \end{cases}$$

Содержание СГ в ГЖС вычисляется как

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{Q_{\Gamma}}{Q_{\Gamma} + Q_{\text{ж}}} = \frac{f_{\Gamma} v_{\text{м}\Gamma}}{f_{\Gamma} v_{\text{м}\Gamma} + f_{\text{ж}}} = \frac{f_{\Gamma}}{f_{\Gamma} + f_{\text{ж}}} \frac{v_{\text{м}\text{ж}}}{v_{\text{м}\Gamma}} = \\ &= \frac{f_{\Gamma}}{f_{\Gamma} + f_{\text{ж}}} \frac{v_{\text{м}\Gamma} + \Delta v}{v_{\text{м}\Gamma}}. \end{aligned}$$

Выведенные уравнения (7)–(9) составляют расчетную модель, которая позволяет проводить многофакторный численный эксперимент с матрицей параметров, определять напор, дав-

ление с учетом различных ФХС и геометрических параметров проточной части ступени.

В качестве примера для осевой мультифазной ступени, описанной в статье [9], проведен расчет с помощью предложенной методики. Для шнекового РК ЛМК сепарации $k_{ms} = 0,22$ и $m_s = 32,3$. Для ступеней диагонального, осе-диагонального и центробежного типа расчеты выполняются аналогичным образом.

При стремлении отношения $v_{mг}/v_{mж}$ к единице образуется газовая пробка, и относительная площадь, занимаемая газом, стремится к единице, газ полностью перекрывает проточную часть мультифазной ступени. Это явление можно подтвердить, анализируя значения от-

носительной площади, занимаемой газом (табл. 1 и 2).

В табл. 1 приведены параметры осевой мультифазной ступени с ЛМК сепарации $k_{ms} = 0,22$, $m_s = 32,3$ при содержании СГ в ГЖС $\beta = 25, 50$ и 75% , а в табл. 2 — при диаметре пузырьков СГ $d_r = 300$ и 130 мкм.

Зависимости относительного теоретического напора осевой мультифазной ступени $H_{ТГЖС}/H_{Т,ж}$ от ЛМК сепарации k_{msg} при различных значениях содержания СГ в ГЖС β показаны на рис. 1. Видно, что чем выше ЛМК сепарации k_{msg} в соответствии с формулой (1), тем больше скорость проскальзывания пузырьков СГ, площадь, занимаемая ГФ, меридианная

Таблица 1

Параметры осевой мультифазной ступени при ЛМК сепарации $k_{ms} = 0,22$, $m_s = 32,3$ и различных значениях содержания СГ в ГЖС

k_{msg}	$\frac{\Delta v_m}{v_{mж}}$	$\frac{f_r}{f}$	$\frac{f_{ж}}{f}$	$\frac{v_{mг}}{v_m}$	$\frac{v_{mж}}{v_m}$	$\frac{H_{ТГЖС}}{H_{Т,ж}}$	$d_r, \text{ мкм}$	$\frac{d_r}{d_{\max}}$
<i>При содержании СГ в ГЖС $\beta = 25 \%$</i>								
0,15	0,14	0,28	0,72	0,89	0,72	0,97	124	0,13
0,25	0,23	0,30	0,70	0,83	1,10	0,94	162	0,16
0,50	0,42	0,37	0,63	0,68	1,18	0,86	236	0,24
0,75	0,57	0,43	0,57	0,58	1,33	0,75	303	0,31
1,00	0,67	0,50	0,50	0,50	1,50	0,62	377	0,38
1,25	0,74	0,56	0,44	0,45	1,70	0,47	472	0,48
1,50	0,78	0,60	0,40	0,41	1,90	0,30	624	0,63
1,75	0,82	0,65	0,35	0,39	2,14	0,14	987	1,00
<i>При содержании СГ в ГЖС $\beta = 50 \%$</i>								
0,10	0,095	0,53	0,47	0,95	1,05	0,96	125	0,11
0,25	0,220	0,56	0,44	0,89	1,14	0,89	202	0,17
0,50	0,380	0,62	0,38	0,81	1,30	0,77	302	0,26
0,75	0,500	0,67	0,33	0,75	1,50	0,62	400	0,34
1,00	0,590	0,70	0,30	0,70	0,30	0,46	521	0,45
1,25	0,640	0,74	0,26	0,68	1,93	0,30	708	0,60
1,50	0,700	0,77	0,23	0,65	2,15	0,12	1168	1,00
<i>При содержании СГ в ГЖС $\beta = 75 \%$</i>								
0,05	0,05	0,76	0,24	0,99	1,04	0,97	124	0,09
0,25	0,20	0,79	0,21	0,95	1,20	0,85	291	0,22
0,50	0,35	0,82	0,18	0,91	1,40	0,69	444	0,34
0,75	0,45	0,85	0,15	0,90	1,60	0,52	608	0,46
1,00	0,54	0,87	0,13	0,87	1,90	0,34	840	0,64
1,25	0,60	0,90	0,10	0,85	2,10	0,16	1322	1,00

Таблица 2

**Параметры осевой мультифазной ступени при ЛМК сепарации $k_{ms} = 0,22$, $m_s = 32,3$
и различных значениях диаметра пузырьков СГ**

β , %	k_{msg}	$\frac{\Delta v_m}{v_{mж}}$	$\frac{f_r}{f}$	$\frac{f_{ж}}{f}$	$\frac{v_{mг}}{v_m}$	$\frac{v_{mж}}{v_m}$	$\frac{H_{тГЖС}}{H_{т.ж}}$	$\frac{H_{тГЖС\rho_{ГЖС}}}{H_{т.ж\rho_{ж}}}$
При диаметре пузырьков СГ $d_s = 300$ мкм								
10	0,9000	0,73	0,29	0,71	0,35	1,30	0,80	0,72
20	0,7900	0,60	0,39	0,61	0,52	1,30	0,77	0,61
30	0,6870	0,52	0,47	0,53	0,64	1,32	0,75	0,53
40	0,5900	0,45	0,55	0,45	0,73	1,32	0,76	0,45
50	0,4966	0,38	0,62	0,38	0,81	1,30	0,77	0,38
60	0,4052	0,32	0,69	0,31	0,87	1,28	0,79	0,31
75	0,2650	0,22	0,79	0,21	0,95	1,21	0,84	0,21
При диаметре пузырьков СГ $d_s = 130$ мкм								
10	0,1980	0,19	0,12	0,88	0,83	1,02	0,98	0,88
20	0,1746	0,17	0,23	0,77	0,87	1,04	0,97	0,78
30	0,1520	0,15	0,33	0,67	0,90	1,05	0,96	0,67
40	0,1300	0,12	0,43	0,57	0,93	1,06	0,96	0,58
50	0,1083	0,10	0,53	0,47	0,95	1,06	0,96	0,48
60	0,0868	0,08	0,62	0,38	0,97	1,05	0,96	0,38

составляющая скорости движения ЖФ и тем меньше теоретический напор ступени согласно выражениям (2) и (3).

Как следует из табл. 1, 2 и рис. 2 и 3, содержание СГ в ГЖС мало влияет на теоретический напор ступени при одинаковых диаметрах пузырьков СГ. При постоянном же содержании СГ в ГЖС диаметр пузырьков СГ оказывает заметное влияние на теоретический напор ступени.

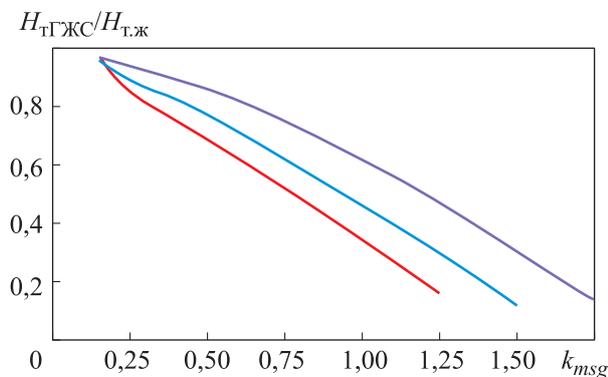


Рис. 1. Зависимости относительного теоретического напора осевой мультифазной ступени $H_{тГЖС}/H_{т.ж}$ от ЛМК сепарации k_{msg} при содержании СГ в ГЖС $\beta = 0,25$ (—), $0,50$ (—) и $0,75$ % (—)

Объяснить это явление можно, анализируя формулу (1). ЛМК сепарации для ГЖС и, соответственно, относительная скорость проскальзывания пузырьков СГ заметно повышаются с увеличением диаметра пузырьков СГ, так как зависят от этого параметра в квадрате. С ростом скорости проскальзывания увеличиваются площадь, занятая ГФ, меридианная скорость

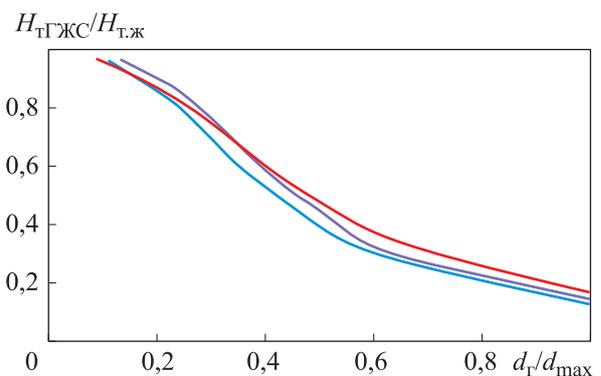


Рис. 2. Зависимости относительного теоретического напора осевой мультифазной ступени $H_{тГЖС}/H_{т.ж}$ от относительного диаметра пузырьков СГ d_r/d_{max} при ЛМК сепарации $k_{ms} = 0,22$, $m_s = 32,3$ и содержании СГ в ГЖС $\beta = 0,25$ (—), $0,50$ (—) и $0,75$ % (—)

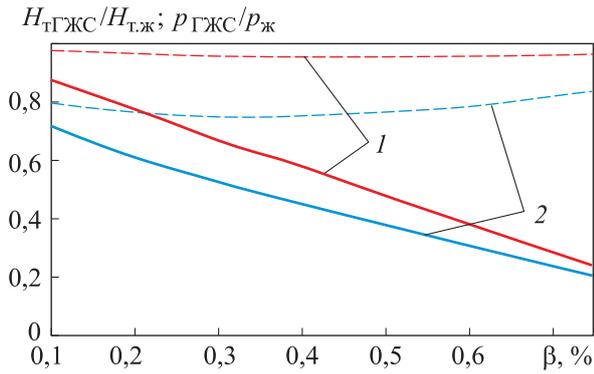


Рис. 3. Зависимости относительного теоретического напора $H_{тГЖС}/H_{т.ж}$ (штриховые линии) и относительного перепада давления, создаваемого осевой мультифазной ступенью, $p_{ГЖС}/p_{ж}$ (сплошные линии) от содержания СГ в ГЖС β при ЛМК сепарации $k_{ms} = 0,22$, $m_s = 32,3$ и диаметре пузырьков СГ $d_r = 130$ (1) и 300 мкм (2)

течения ЖФ и теоретический напор ступени согласно выражениям (1) и (2).

При увеличении содержания СГ с ЛМК сепарации для ГЖС и скорость проскальзывания пузырьков СГ уменьшаются, вследствие чего теоретический напор при работе на ГЖС остается неизменным.

Содержание СГ в ГЖС оказывает существенное влияние на перепад давления, создаваемого ступенью. В основном это обусловлено снижением плотности ГЖС, так как давление, создаваемое ступенью пропорционально произведению напора на плотность РЖ.

Таким образом, получена следующая система уравнений:

$$\beta = \frac{Q_{\Gamma}}{Q_{\Gamma} + Q_{\text{ж}}};$$

$$k_{msg} = \frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_r^2 g (\rho_{\text{ГЖС}} - \rho_{\Gamma}) \Delta H_{\text{ст.ГЖС}}}{24 v \rho_{\text{ж}} v_m \Delta S};$$

$$k_{ms} = \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ГЖС}} - \rho_{\Gamma}} \frac{\Delta H_{\text{ст.ж}}}{\Delta H_{\text{ст.ГЖС}}} k_{msg};$$

$$\Delta v = k_{msg} v_m = k_{msg} \frac{Q_{\text{см}}}{f};$$

$$v_{m\Gamma} = \frac{1}{2f} \left[(Q_{\text{ГЖС}} - f \Delta v) + \sqrt{(Q_{\text{ГЖС}} - f \Delta v)^2 + 4 f Q_{\Gamma} \Delta v} \right];$$

$$v_{m\text{ж}} = v_{m\Gamma} + \Delta v;$$

$$\frac{f_{\Gamma}}{f} = \frac{Q_{\Gamma}}{v_{m\Gamma} f};$$

$$\frac{f_{\text{ж}}}{f} = 1 - f_{\Gamma};$$

$$\Delta H_{\text{т.ст.ГЖС}} = \frac{\Gamma_m}{2g} \left[u_2^2 - (v_{2m\Gamma} u_2 \text{ctg} \beta_2)^2 \right] + \frac{(1 - \Gamma_m)}{2g} \left[u_2^2 - (v_{2m\text{ж}} u_2 \text{ctg} \beta_2)^2 \right];$$

$$H_{\text{тГЖС}} = \frac{1}{g} \left[u_2^2 - \Gamma_m v_{2m\Gamma} u_2 \text{ctg} \beta_2 - (1 - \Gamma_m) v_{2m\text{ж}} u_2 \text{ctg} \beta_2 \right];$$

$$H_{\text{т.отнГЖС}} = \frac{H_{\text{тГЖС}}}{H_{\text{т.ж}}};$$

$$\frac{v_{m\Gamma}}{v_m} = \frac{1}{2 f v_m} \left[(Q_{\text{ГЖС}} - f \Delta v) + \sqrt{(Q_{\text{ГЖС}} - f \Delta v)^2 + 4 f Q_{\Gamma} \Delta v} \right];$$

$$\frac{v_{m\text{ж}}}{v_m} = \frac{v_{m\Gamma} + \Delta v}{v_m};$$

$$d_r = \sqrt{k_{msg} \frac{24 v}{g m_s} \frac{\rho_{\text{ж}}}{(\rho_{\text{ГЖС}} - \rho_{\Gamma})} \frac{\Delta H_{\text{ст.ж}}}{\Delta H_{\text{ст.ГЖС}}}}. \quad (9)$$

Формулы, входящие в состав системы уравнений (9), позволяют оценить при заданном ЛМК сепарации изменение теоретического напора и давления, развиваемых мультифазными лопастными ступенями при работе на ГЖС, определить скорости движения ГФ и ЖФ, занимаемые ими площади в зависимости от ФХС, включая диаметр дискретных частиц, содержание СГ.

Выводы

1. Выведены уравнения, позволяющие при заданном для проточной части РК ЛМК сепарации оценить изменение теоретического напора и давления, которые развивают мультифазные лопастные ступени при работе на ГЖС, скорости движения ЖФ и ГФ, занимаемые ими площади в зависимости от ФХС, включая диаметр дискретных частиц, содержание СГ в ГЖС.

2. На примере расчета осевой мультифазной ступени с ЛМК сепарации для шнекового РК $k_{ms} = 0,22$ и $m_s = 32,3$ показано, что содержание СГ оказывает незначительное влияние на теоретический напор ступени, а диаметр пузырьков СГ — значительное. Содержание СГ в ГЖС существенно влияет на перепад давления, создаваемого ступенью.

3. Установлено, что при стремлении отношения скорости проскальзывания ГФ к скорости движения ЖФ к единице образуется газовая пробка, относительная площадь, занятая газообразной фазой, стремится к единице, газ полностью перекрывает проточную часть мультифазной ступени, и РК перестает создавать напор и давление.

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 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] 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] Ломакин В.О., Петров А.И., Кулешова М.С. Исследование двухфазного течения в осецентробежном колесе методами гидродинамического моделирования. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 9. EDN: TDPOJT
- [12] 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>
- [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] Толстогузов О.А., Кропоткин А.А., Малявко Е.А. Опыт испытаний полнокомплектных погружных установок на стендах-скважинах ОКБ БН. *Арсенал нефтедобычи*, 2015, № 1(18), с. 8–11.

- [16] Ляпков П.Д. Движение сферической частицы относительно жидкости в межлопаточном канале рабочего колеса центробежного насоса. *Труды МИНХ и ГП*, 1977, № 129, с. 3–36.
- [17] Соу С. *Гидродинамика многофазных систем*. Москва, Мир, 1971. 536 с.
- [18] Мищенко И.Т. *Скважинная добыча нефти*. Москва, Нефть и газ, 2003. 816 с.
- [19] Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. *Гидравлика газожидкостных систем*. Москва-Ленинград, Госэнергоиздат, 1958. 232 с.
- [20] Подвидз Л.Г., ред. *Методическое пособие по расчету шнекоцентробежной ступени насоса*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1975. 64 с.
- [21] 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>
- [22] Пфлейдерер К. *Лопаточные машины для жидкостей и газов*. Москва, Машгиз, 1960. 683 с.
- [23] 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>
- [24] 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>
- [25] Gousov 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>
- [26] 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>
- [27] Овсянников Б.В., Чебоевский В.Ф. *Высокооборотные лопаточные насосы*. Москва, Машиностроение, 1975. 336 с.
- [28] 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 elektrosentrobezhnykh 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-promyshlennoye vnedreniye pogruzhnykh UETsN kontseptualno novoy konstruktsii 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 impuri-

- ties]. 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] 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] 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.).
- [12] 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>
- [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] Tolstoguzov O.A., Kropotkin A.A., Malyavko E.A. Experience of testing complete submersible installations on well rigs of the BN Design Bureau. *Arsenal nefte dobychi*, 2015, no. 1, pp. 26–30. (In Russ.).
- [16] 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.).
- [17] Soo S. *Fluid dynamics of multiphase systems*. Blaisdell, 1967. 524 p. (Russ. ed.: *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem*. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.)
- [18] Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefti* [Borehole oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2003. 816 p. (In Russ.).
- [19] Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidravlika gazozhidkostnykh sistem* [Hydraulics of gas-liquid systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. 232 p. (In Russ.).
- [20] Podvidz L.G., ed. *Metodicheskoe posobie po raschetu shneko-tsentrobezchnoy stupeni nasosa* [Methodical guide for calculation of screw-centrifugal pump stage]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1975. 64 p. (In Russ.).
- [21] 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>

- [22] Pfeleiderer 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.)
- [23] 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>
- [24] 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>
- [25] Gouskov 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>
- [26] 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>
- [27] Ovsyannikov B.V., Cheboevskiy V.F. *Vysokooborotnye lopatochnye nasosy* [High-speed vane pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 336 p. (In Russ.).
- [28] Sherstyuk A.N., Meshalkin S.M., Trulev A.V. et al. Selection of design operation mode of submerged oil pump stage. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie*, 2003, no. 8, pp. 29–30. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 00.02.2025

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).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трулев А.В., Тимушев С.Ф. Влияние локального мультифазного коэффициента сепарации и содержания свободного газа на напор ступени при работе на газожидкостной смеси. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 12, с. 88–99.

Please cite this article in English as:

Trulev A.V., Timushev S.F. Influence of the local multiphase separation coefficient and free gas content on the pressure of the stage when operating on a gas-liquid mixture. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 12, pp. 88–99.