

УДК 622.323, 621.6.078

Совершенствование проточной части диагональных ступеней с использованием мультифазных коэффициентов

А.В. Трулев¹, С.Ф. Тимушев², В.О. Ломакин¹, Е.М. Шмидт³, А.В. Клипов³¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Московский авиационный институт³ ООО «Римера-Алнас»

Improvement of the flow part of diagonal stages using multiphase coefficients

A.V. Trulev¹, S.F. Timushev², V.O. Lomakin¹, E.M. Shmidt³, A.V. Klipov³¹ Bauman Moscow State Technical University² Moscow Aviation Institute (National Research University)³ Rimera-Alnas LLC

Предложены уточненные коэффициенты и соотношения геометрических размеров, позволяющие разрабатывать осевые, диагональные и оседиагональные мультифазные высокоэффективные ступени с большим напором при работе на воде и газожидкостной смеси. Показано, что в состав формул для вычисления локального коэффициента статического напора, локальных мультифазных коэффициентов быстроходности и сепарации, используемых при расчете проточной части мультифазных ступеней, входят параметры, полученные при работе гидромашин на чистой рабочей жидкости без газа. На их основе построена методика расчета геометрических параметров проточной части мультифазной ступени и оценки ее эффективности при работе на мультифазной смеси с учетом конкретных физико-химических свойств. Приведены напорные характеристики новых диагональных ступеней в сравнении с таковыми типовых оседиагональных и осевых мультифазных ступеней при работе на воде и газожидкостной смеси. Предложена таблица с параметрами, определяющими работу мультифазных ступеней на газожидкостной смеси, которые можно использовать при разработке новых и оценке эффективности существующих конструкций. Показано, что по напору и эффективности разработанная диагональная ступень превосходит оседиагональные и осевые мультифазные ступени при работе на воде и газожидкостной смеси. Приведены примеры применения локального коэффициента статического напора и локального мультифазного коэффициента быстроходности для оценки работы мультифазных ступеней на газожидкостной смеси.

EDN: PGYCRC, <https://elibrary/pgycrc>

Ключевые слова: диагональные ступени, газожидкостная смесь, проточная часть, локальный мультифазный коэффициент сепарации, локальный коэффициент статического напора, локальный мультифазный коэффициент быстроходности

Refined coefficients and ratios of geometric dimensions are proposed that make it possible to develop axial, diagonal and axial-diagonal multiphase high efficiency stages with high pressure when operating on water and a gas-liquid mixture. It is shown that the formulas for the local static head coefficient, local multiphase coefficient of rotation speed used in calculating the flow part of multiphase stages include parameters obtained when operating on liquid without gas. Based on these coefficients, a method has been developed for calculating the geometry of

the flow part of multiphase stages and evaluating the efficiency of pumps in a multiphase mixture, taking into account physico-chemical properties. The head characteristics of the new diagonal stages are given in comparison with characteristics of typical axial-diagonal and axial multiphase stages when operating on water and gas-liquid mixtures. A table with parameters defining the operation of multiphase stages on a gas-liquid mixture is proposed, which can be used in the development of new and evaluation of the effectiveness of existing pumps. It is shown that in terms of head and efficiency, the developed diagonal pumps are superior to the axial-diagonal and axial pumps when operating on water and a gas-liquid mixture. Examples of the application of a local static head coefficient and a local multiphase coefficient of rotation speed for evaluating the operation of multiphase stages on a gas-liquid mixture are given.

EDN: PGYCRC, <https://elibrary/pgycrc>

Keywords: diagonal stages, gas-liquid mixture, flow part, local static head coefficient, local multiphase coefficient of rotation speed

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

Оборудование для эффективной добычи пластовой жидкости в осложненных условиях эксплуатации описано в статьях [3, 5–16].

При высоком содержании СГ на входе в погружную установку ЭЦН подача и развиваемое давление заметно снижаются. Работа ЭЦН становится неустойчивой и характеризуется колебаниями подачи, давления и мощности. Колебания параметров ЭЦН приводят к повышению вибрации и, соответственно, к низким наработкам. При дальнейшем повышении содержания СГ в пластовой жидкости возникают газовые пробки и срыв подачи ЭЦН [3, 17].

На сегодняшний день используются лопастные мультифазные ступени различного конструктивного исполнения: центробежные, диагональные 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 при работе лопастных мультифазных ступеней на ГЖС, поиску возможностей по совершенствованию конструкций посвящены труды [5, 10, 17–20].

Вопросы течения потока в лопастных решетках рассмотрены в работах [10–14, 25].

Результаты исследования течения жидкой и мультифазной сред численными методами приведены в статьях [10, 21–25].

Цель работы — представить уточненные коэффициенты и соотношения геометрических

размеров, позволяющие разрабатывать мультифазные ступени с высоким напором при работе на воде и ГЖС, на примере высокоэффективной диагональной мультифазной шнековой ступени повышенной напорности.

Модель рабочей жидкости (РЖ). В качестве модели РЖ рассмотрена квазигомогенная мелкодисперсная ГЖС. Принято, что в проточной части лопастных гидромашин отсутствуют газовые каверны и деградация напорных характеристик, по крайней мере, в рабочей области. В таких условиях, как правило, работают погружные установки в скважинах, добывающих пластовую жидкость, при условии, что допустимое содержание СГ не превышает заданного значения [1–5, 17–19].

С учетом того, что на входе в многоступенчатый ЭЦН, содержащий около 500...600 ступеней, давление РЖ обычно составляет около 50 атм (~5 МПа), сжимаемостью ГЖС в пределах одной ступени можно пренебречь.

Совершенствование проточной части мультифазных ступеней с использованием локальных мультифазных коэффициентов. В статье [10] дана оценка эффективности сборок осевых и диагональных мультифазных ступеней, которые имели примерно одинаковые значения локального мультифазного коэффициента (ЛМК) сепарации, но различные значения локального коэффициента статического напора (ЛКСН).

При разработке новых мультифазных ступеней с меньшими подачами и, соответственно, пониженными коэффициентами быстроходности, использована та же методика, которая позволяет создавать проточную часть с определенным соотношением изменения статического напора и скорости потока, обеспе-

чивает движение потока ГЖС с определенной относительной скоростью проскальзывания пузырьков СГ без крупных газовых каверн, пробок и срыва подачи. Получены уточненные значения параметров, используемых при разработке геометрических параметров проточной части.

Локальные коэффициенты, используемые для оценки эффективности работы мультифазных ступеней. При разработке использованы следующие коэффициенты [10].

ЛМК сепарации без учета физико-химических свойств (ФХС). При работе ступени на чистой воде без газа ЛМК сепарации определяется выражением

$$m_s = \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{\Delta S} \frac{1}{v_m}, \quad (1)$$

где $\Delta H_{\text{ст}}$ — изменение статического напора на локальном участке ΔS ; v_m — средняя скорость течения РЖ.

Например, можно разбить среднюю линию меридианного сечения рабочего колеса (РК) на несколько участков или рассмотреть его интегрально. В этом случае изменение статического напора следует исследовать на всей длине средней линии проточной части РК, используя выражение со средней меридианной скоростью

$$v_m = \frac{v_{m \text{ вх}} + v_{m \text{ вых}}}{2},$$

где $v_{m \text{ вх}}$ и $v_{m \text{ вых}}$ — меридианная скорость на входе и выходе из локального участка.

ЛМК сепарации с учетом ФХС. При работе лопастной гидромашины на чистой воде ЛМК сепарации, представляющий собой относительную скорость проскальзывания одиночного пузырька диаметром 130 мкм, вычисляется как

$$k_{ms} = \frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_d^2 g}{24 \nu v_m \Delta S} = k_{\text{ФХС}} m_s, \quad (2)$$

где Δv — скорость течения жидкой фазы; d_d — диаметр дискретной газообразной частицы; g — ускорение свободного падения; ν — кинематическая вязкость жидкой фазы; $k_{\text{ФХС}}$ — коэффициент, определяющий ФХС мультифазной смеси.

С учетом того, что вязкость воды и диаметр пузырька известны, можно записать

$$k_{\text{ФХС}} = \frac{d_d^2 g}{24 \nu} = 6,9 \cdot 10^{-3}$$

и

$$k_{ms} = 6,9 \cdot 10^{-3} m_s \cdot 100 \text{ \%}.$$

Коэффициент k_{ms} позволяет оценить физическую природу явления и влияние на него ФХС.

ЛМК быстроходности. Чтобы определить, как меняются ЛМК сепарации при изменении частоты вращения ротора n , введен коэффициент быстроходности

$$n_m = \frac{n}{g} \frac{1}{m_s}. \quad (3)$$

Отсюда имеем

$$m_s = \frac{n}{g} \frac{1}{n_m}.$$

Тогда относительная скорость проскальзывания одиночного пузырька

$$k_{ms} = 6,9 \cdot 10^{-3} \frac{n}{g} \frac{1}{n_m}.$$

Относительная скорость проскальзывания и ЛМК сепарации пропорциональны частоте вращения ротора.

ЛКСН. Этот коэффициент вычисляется по формуле

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

где Q — расход РЖ.

ЛКСН позволяет определять изменение статического напора на локальном участке проточной части, например, отдельно в РК или на характерном участке РК. В обозначении ЛКСН можно указывать локальный участок, к которому он относится, например, для РК $n_{\text{с.нРК}}$.

ЛКСН, ЛМК сепарации и быстроходности вычисляются для лопастных решеток гидромашин при работе на чистой воде, поэтому однозначно определяют геометрические параметры проточной части, и могут использоваться в методике разработки мультифазных ступеней.

Для мультифазных ступеней выведенные ЛКСН, ЛМК сепарации и быстроходности рассчитываются в номинальном режиме работы. Пример расчета коэффициента быстроходности при номинальной подаче (а не при оптимальной) приведен в работе [26].

Анализ сравнительных испытаний мультифазных ступеней. Напорные характеристики новых диагональных и типовых оседиагональ-

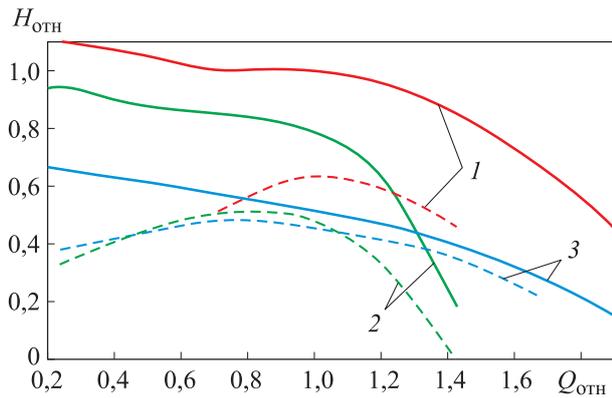


Рис. 1. Напорные характеристики первой диагональной (1), оседиагональной (2) и осевой (3) мультифазных ступеней при работе на воде (сплошные линии) и ГЖС (штриховые линии)

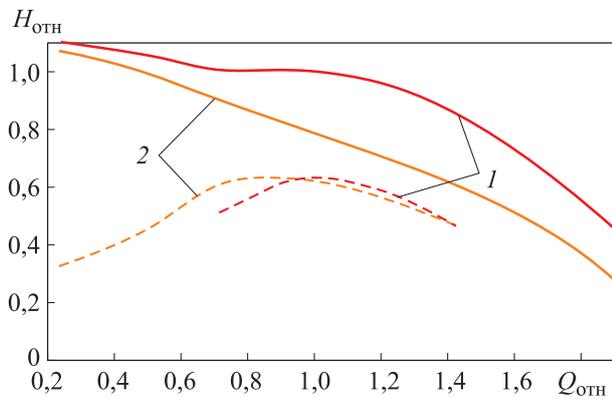


Рис. 2. Напорные характеристики первой (1) и второй (2) новых диагональных ступеней при работе на воде (сплошные линии) и ГЖС (штриховые линии)

ной и осевой мультифазных ступеней приведены на рис. 1 и 2. Здесь введены следующие обозначения: $H_{отн}$ — относительный напор ступени, $H_{отн} = H/H_{ном,д,ст1}$ (H — напор ступени; $H_{ном,д,ст1}$ — напор первой новой диагональной

ступени при номинальном расходе РЖ); $Q_{отн}$ — относительный расход РЖ, $Q_{отн} = Q/Q_{ном}$ ($Q_{ном}$ — номинальный расход РЖ).

Расчеты проведены в программном комплексе по CFD-анализу с использованием модели Eulerian Multiphase.

Параметры ступеней, влияющие на их эффективность, приведены в таблице, где коэффициент быстроходности определяется выражением

$$n_s = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Конструкция ступеней аналогична таковой ступеней, описанных в работе [12]. Первая диагональная ступень имеет полуоткрытое РК без ведомого диска, осевой зазор между лопастями и направляющим аппаратом составляет 2 мм. Конструкция второй диагональной ступени отличается от первой тем, что осевой зазор равен 3,5 мм.

Если известен напор шнековой ступени H и геометрические параметры проточной части, то можно определить гидравлический КПД η_r из выражения

$$H = \eta_r \frac{u_{cp2}c_{u2}}{g},$$

где u_{cp2} — среднее значение окружной скорости шнека на выходе; c_{u2} — окружная составляющая абсолютной скорости потока на выходе из шнека.

Соответственно, изменение статического напора РК можно вычислить по формуле

$$\Delta H_{стРК} = \frac{\eta_r}{g} \left(u_{cp2}c_{u2} - \frac{c_{u2}^2}{2} \right).$$

Обе диагональные ступени превосходят серийные аналоги по напорности при работе на

Параметры оседиагональной, диагональных и осевой мультифазных ступеней

Параметр	Значение для ступени			
	осе- диагональной	осевой	первой диагональной	второй диагональной
ЛКСН для ступени $n_{с,нСТ}$	222	299	183	222
ЛКСН для РК $n_{с,нРК}$	85	110	70	83
ЛМК сепарации для РК: без учета ФХС $m_{сРК}$	42,0	39,6	35,1	28,2
с учетом ФХС $k_{msРК}$	29,0	27,4	24,3	18,3
ЛМК быстроходности $n_{тРК}$	7,1	7,5	8,5	10,5
Отношение напоров $\frac{H_{ГЖС}}{H} \cdot 100\%$	60,0	86,6	65,1	82,0

ГЖС, которая определяется как отношение напора H к монтажной высоте ступени L .

Первая диагональная ступень превосходит все ступени по напорности при работе на чистой воде и по КПД.

Оседиагональная ступень заметно уступает всем аналогам по КПД и деградации напорной характеристики при наличии газа в РЖ, которая определяется как отношение напора при работе на ГЖС к напору при работе на чистой воде $(H_{\text{ГЖС}}/H) \cdot 100\%$.

Осевая мультифазная ступень превосходит аналоги тем, что имеет наименьшую деградацию напорной характеристики при работе на ГЖС, однако заметно уступает по напорности при работе на воде и ГЖС.

По совокупности параметров лучшей является первая диагональная ступень, ей немного уступает вторая диагональная ступень.

С учетом того, что в таблице собраны параметры по лучшим осевым, оседиагональным и диагональным мультифазным ступеням, их можно использовать при разработке новых и оценке эффективности существующих конструкций.

ЛМК сепарации, который зависит от отношения изменения статического напора на длине средней линии проточной части РК к средней меридианной скорости потока, является одним из важных конструктивных параметров, определяющих относительную скорость проскальзывания и, соответственно, деградацию напорной характеристики ступени при работе на ГЖС. Также на нее влияет коэффициент укрупнения (коалесценции) пузырьков газа, зависящий от конструкции ступени, который меняет средний диаметр пузырьков СГ при их движении через проточную часть. Коэффициент коалесценции зависит от статического напора, длины, числа и высоты лопастей РК.

Сравнение параметров первой и второй диагональных ступеней, имеющих одинаковые геометрические параметры проточной части и различающихся лишь осевым зазором, который определяет гидравлический КПД и, соответственно, напор РК, показывает, как ЛМК влияют на напор ступени при работе на ГЖС.

ЛМК сепарации и быстроходности определяются по формулам (1)–(3), ЛКСН по формуле (4) при номинальном расходе РЖ. У первой диагональной ступени ЛКСН составляет 70,

у второй — 83. Из формулы (4) можно найти изменение статического напора, которое при работе на чистой воде составляет 4,2 и 3,3 м соответственно.

ЛМК сепарации на воде и относительная скорость проскальзывания одиночного пузырька равны 24,3 и 18,3 соответственно.

Пузырьки СГ уменьшают проходное меридианное сечение проточной части, теоретический напор ступени и, соответственно, увеличивают коэффициент деградации напора при работе на ГЖС, значения которого составляют 65,1 и 82,0 %.

Для понимания полезности ЛКСН и ЛМК быстроходности при разработке и оценке эффективности мультифазных ступеней, работающих на ГЖС, можно сравнить параметры оседиагональной и второй диагональной ступеней.

Обе ступени имеют одинаковый коэффициент быстроходности, равный 222. ЛКСН для РК мало различаются и определяют почти одинаковый перепад статического напора при работе на воде (около 3,3 м). Ввиду того, что длина средней линии и меридианная скорость потока в оседиагональной ступени примерно на 30 % меньше, чем у второй диагональной ступени, заметно различаются относительные скорости проскальзывания для одиночного пузырька и определяемые ими деградации напорных характеристик при работе на ГЖС: 60 и 82 % соответственно.

Выводы

1. Приведены результаты сравнения напорных характеристик новых диагональных мультифазных ступеней с типовыми оседиагональной и осевой при работе на воде и ГЖС.

2. Предложена таблица с параметрами, определяющими работу передовых диагональных, оседиагональных и осевых мультифазных ступеней на воде и ГЖС, которые можно использовать при разработке новых и оценке эффективности существующих конструкций.

3. Показано, что новая диагональная мультифазная ступень по напорности и эффективности превосходит оседиагональную и осевую при работе на воде и ГЖС.

4. Даны примеры применения ЛКСН и ЛМК быстроходности для оценки работы мультифазных ступеней на ГЖС.

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] Мищенко И.Т. *Скважинная добыча нефти*. Москва, Нефть и газ, 2003. 816 с.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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>
- [11] Мусинский А.Н. *Разработка и исследование вихревых газосепараторов для высокодебитных скважин*. Дисс. ... канд. тех. наук. Пермь, ПНИПУ, 2021. 172 с.
- [12] 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
- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] Ляпков П.Д. Движение сферической частицы относительно жидкости в межлопаточном канале рабочего колеса центробежного насоса. *Труды МИНХ и ГПИ*, 1977, № 129, с. 3–36.

- [18] Соу С. *Гидродинамика многофазных систем*. Москва, Мир, 1971. 536 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 шнеко-центробежной ступени насоса*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1975. 64 с.
- [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] 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>
- [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., Чебаевский В.Ф. *Высокооборотные лопаточные насосы*. Москва, Машиностроение, 1975. 336 с.

References

- [1] Drozdov A.N. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi pogrzhnymi 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 pogrzhnymi tsentroběžnymi nasosami pri otkachke gazozhidkostnykh smesey* [Increase of well operation efficiency by submersible centrifugal pumps during pumping of gas-liquid mixtures]. Moscow, RGU nefi 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 nefi 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 pogrzhnykh elektrosentroběžnykh ustanovok pri dobyche nefi 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] Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefi* [Borehole oil production]. Moscow, Neft i gaz Publ., 2003. 816 p. (In Russ.).
- [6] Trulev A.V., Loginov V.F., Gorbunov S.I. et al. *Razrabotka i opytno-promyshlennoye vnedreniye pogrzhnykh 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.).
- [7] 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.).
- [8] 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.).

- [9] 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.).
- [10] 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 vysokikh 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.).
- [11] 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.).
- [12] 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.).
- [13] 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>
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] 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.).
- [18] Soo S. *Fluid dynamics of multiphase systems*. Blaisdell, 1967. 524 p. (Russ. ed.: *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem*. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.)
- [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-tsentrobezhnoy stupeni nasosa* [Methodical guide for calculation of screw-centrifugal pump stage]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1975. 64 p. (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] 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>
- [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] 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.)
- [26] Ovsyannikov B.V., Cheboevskiy V.F. *Vysokooborotnyye lopatochnye nasosy* [High-speed vane pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 336 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.03.2025

Информация об авторах

ТРУЛЕВ Алексей Владимирович — кандидат технических наук, инженер лаборатории «Лопастные машины» Научно-учебного комплекса «Энергомашиностроение». 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, профессор кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: lomakin@bmstu.ru).

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

Information about the authors

TRULEV Aleksey Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Engineer, Laboratory of Blade Machines, Scientific and Educational Complex Power Engineering. 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).

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

SHMIDT Evgeniy Mstislavovich — Head of the Department of Pumping Equipment Development. Rimera-Alnas LLC (423450, Almet'yevsk, Russian Federation, Surgut'skaya St., Bldg. 2, e-mail: Evgeniy.Shmidt@rimera.com).

KLIPOV Aleksandr Valeryevich — Leading Design Engineer, Department of Pumping Equipment Development. Rimera-Alnas LLC (423450, Almet'yevsk, Russian Federation, Surgut'skaya St., Bldg. 2, e-mail: Aleksandr.Klipov@rimera.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трулев А.В., Тимушев С.Ф., Ломакин В.О., Шмидт Е.М., Клипов А.В. Совершенствование проточной части диагональных ступеней с использованием мультифазных коэффициентов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 11, с. 104–112.

Please cite this article in English as:

Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O., Shmidt E.M., Klipov A.V. Improvement of the flow part of diagonal stages using multiphase coefficients. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 11, pp. 104–112.