

УДК 622.323/621.6.078

Совершенствование проточной части осевых шнековых 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 институт (национальный исследовательский университет)³ ООО «Римера-Алнас»

Improving flow path of the axial screw stages using the multiphase coefficients

A.V. Trulev¹, S.F. Timushev², V.O. Lomakin¹, E.M. Schmidt³, A.V. Klipov³¹ Bauman Moscow State Technical University² Moscow Aviation Institute (National Research University)³ Rimeria-Alnas LLC

Предложены уточненные коэффициенты и соотношения геометрических размеров, составляющие основу методики, позволяющей разрабатывать мультифазные ступени с высоким напором при работе на воде и газожидкостной смеси. Все коэффициенты, используемые в методике расчета проточной части новых мультифазных ступеней, выведены для работы ступени на чистой рабочей жидкости без газа. Коэффициенты, применяемые для оценки работы мультифазной ступени на газожидкостной смеси, носят информативный характер. Показано, что для разработки новой мультифазной ступени необходимо знать два параметра: локальный коэффициент статического напора и локальный мультифазный коэффициент быстроходности. Первый коэффициент определяет рекомендованный перепад давления на границах локального участка, второй — детальное распределение геометрических параметров проточной части внутри этого участка. Оба коэффициента позволяют вычислять геометрические размеры проточной части рабочего колеса. Даны рекомендации по выбору значений коэффициентов, используемых при разработке новых мультифазных осевых шнековых ступеней. Приведен пример разработки новой мультифазной осевой шнековой ступени с повышенным напором при работе на чистой жидкости и газожидкостной смеси.

EDN: SUIDCL, <https://elibrary/suidcl>

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

The paper proposes the refined coefficients and ratios of the geometric dimensions that form the basis of a methodology making it possible to design and develop the high-pressure multiphase stages operating on water and gas-liquid mixture. All the coefficients used in the methodology for computing the new multiphase stages flow path are derived for a stage operating on the clean working fluid without gas. Coefficients applied to assess the multiphase stage operation on a gas-liquid mixture are informative in nature. The paper shows that two parameters should be known to design and develop a new multiphase stage; they include the local static pressure coefficient and the local multiphase velocity coefficient. The first coefficient determines the recommended pressure drop at the local section boundaries; the second coefficient determines detailed distribution of the flow path geometric parameters in-

side this section. Both coefficients are making it possible to compute the impeller flow path geometric dimensions. The paper presents recommendations for selecting values of the coefficients used in design and development of new multiphase axial screw stages. It provides an example of design and development of a new high-pressure multiphase axial screw stage operating on pure liquid and gas-liquid mixture.

EDN: SUIDCL, <https://elibrary/suidcl>

Keywords: axial screw stages, multiphase stages, gas-liquid mixture, relative slip velocity, local static pressure coefficient, local multiphase velocity coefficient

Для увеличения коэффициента извлечения нефти снижается 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 условиях высокого содержания механических примесей и СГ описано в статьях [3, 5–15].

При высоком содержании СГ в пластовой жидкости на входе в погружную установку ЭЦН подача и развиваемое давление заметно деградируют. Работа ЭЦН становится неустойчивой, характеризуется колебаниями подачи, давления и мощности, что приводит к повышению вибрации и, соответственно, к низким наработкам. При дальнейшем возрастании содержания СГ в пластовой жидкости возникают газовые пробки и срыв подачи ЭЦН [3, 5].

Существуют лопастные мультифазные ступени различного конструктивного исполнения: центробежные, диагональные и осевые. Применяют диспергаторы, установленные на входе в ЭЦН, ступени которых позволяют измельчать пузырьки газожидкостной смеси (ГЖС), конические насосы, состоящие из пакетов ступеней на разную подачу ГЖС.

Изучению причин, приводящих к относительному снижению напора при работе лопастных мультифазных ступеней на ГЖС, поиску возможностей совершенствования конструкций посвящены работы [1, 2, 5].

Вопросы течения потока в лопастных решетках рассмотрены в публикациях [10–16].

Исследования течения жидкой и мультифазной сред численными методами описаны в статьях [10, 17–20].

Цель работы — представить уточненные коэффициенты и соотношения геометрических размеров, составляющие основу методики, позволяющей разрабатывать мультифазные ступени с высоким напором при работе на воде и ГЖС.

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 в ней не превышает заданного значения [1–5, 21–23].

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

Моделирование движения дискретных газобразных частиц. При работе лопастных ступеней на ГЖС пузырьки СГ движутся вместе с основным потоком РЖ в меридианном направлении. В трех направлениях — меридианном, радиальном и нормальном к линиям тока (тангенциальном) — которые в оптимальном режиме соответствуют лопастной решетке, происходит сепарация пузырьков относительно жидкой фазы.

В меридианном направлении сепарация (проскальзывание) на начальном этапе вызывает увеличение скорости течения жидкой фазы пропорционально снижению площади проточной части за счет пузырьков СГ, движущихся с меньшей скоростью, и соответствующему уменьшению напора.

У рабочего колеса (РК) центробежной ступени в тангенциальном направлении, у РК осевых и некоторых диагональных ступеней в радиальном и тангенциальном направлениях отсутствует течение жидкой фазы. Соответственно, движение пузырьков СГ по этим направлениям приводит к повышению концентрации, слиянию, коалесценции и увеличению среднего диаметра пузырьков СГ. При большой длине проточной части, высоком содержании СГ и изна-

чально большом диаметре пузырьков происходит образование газовых каверн и пробок, что сопровождается срывом подачи [1–3, 22, 23].

Совершенствование проточной части осевой шнековой ступени с использованием 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 различались по значениям локального коэффициента статического напора (ЛКСН). У сборок мультифазных диагональных ступеней был самый высокий напор при работе на воде без газа и на ГЖС.

Этот подход показал хорошие результаты и при разработке новой осевой ступени.

Мультифазные коэффициенты. При разработке использованы коэффициенты [10], приведенные в табл. 1 и 2, где k_{ms} и $k_{ms\text{ ном}}$ — ЛМК сепарации с учетом физико-химических свойств ГЖС и его значение при номинальном расходе; m_s — ЛМК сепарации без учета физико-химических свойств ГЖС; n_m — ЛМК быстроходности; $n_{с.нПК}$ — ЛКСН РЖ; $Q_{отн}$ — относительный расход РЖ, $Q_{отн} = Q/Q_{ном}$ (Q и $Q_{ном}$ — расход РЖ и его номинальное значение; n_s — коэффициент быстроходности ступени; k_{msg} и $k_{msg\text{ ном}}$ — относительная скорость проскальзывания при работе на ГЖС и ее значение при номинальном расходе.

Коэффициенты, используемые в методике разработки проточной части новых мультифазных ступеней выведены для работы на чистой воде без газа. Коэффициенты, используемые для оценки работы мультифазной ступени на ГЖС, носят информативный характер.

ЛМК сепарации с учетом физико-химических свойств ГЖС. Для проточной части лопастной гидромашины, работающей на чистой технической воде, — это относительная скорость проскальзывания одиночного пузырька диаметром 130 мкм. То есть ЛМК сепарации с учетом физико-химических свойств ГЖС k_{ms} определяется отношением скорости движения пузырька газа относительно скорости течения жидкой фазы Δv к средней скорости течения РЖ на локальном участке проточной части v_m :

$$k_{ms} = \frac{\Delta v}{v_m} = \frac{d_d^2 (\rho_m - \rho_d)}{24\nu\rho_j\rho_m} \frac{\Delta p}{v_m \Delta S} = \frac{d_d^2 g}{24\nu} \frac{\Delta H_{ст}}{v_m \Delta S} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где d_d и ρ_d — диаметр и плотность дискретной газообразной частицы; ρ_m — плотность ГЖС; ν и ρ_j — кинематическая вязкость и плотность жидкой фазы; $\Delta p/\Delta S$ — величина изменения давления ГЖС Δp на длине средней линии проточной части в радиальном направлении ΔS ; g — ускорение свободного падения; $\Delta H_{ст}$ — величина изменения напора ступени.

Так как в этом случае коэффициент ЛМК сепарации, учитывающий физико-химические свойства ГЖС, является постоянной величиной

Таблица 1

Параметры серийной и новой ступеней при номинальном расходе РЖ

Ступень	k_{ms} , %	m_s	n_m	$n_{с.нПК}$	n_s
Серийная	22,0	32,2	9,2	132	350
Новая	22,7	33,3	8,8	119	316

Таблица 2

Значения ЛМК для различных режимов работы шнека с новой проточной частью

$Q_{отн}$	k_{ms} , %	$\frac{k_{ms}}{k_{ms\text{ ном}}}$	k_{msg} , %	$\frac{k_{msg}}{k_{msg\text{ ном}}}$	m_s	n_m
0,4	62,9	2,8	9,6	2,10	91,1	3,3
0,6	41,2	1,8	7,5	1,60	59,6	5,0
0,8	30,1	1,3	6,1	1,30	43,5	6,8
1,0	22,7	1,0	4,6	1,00	33,3	8,8
1,2	18,5	0,8	3,4	0,74	26,8	11,1

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

можно записать

$$k_{ms} = 6,9 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{\nu_m \Delta S} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Как показано в работе [24], для лучших мультифазных ступеней $k_{ms} = 20 \dots 25 \text{ \%}$.

Относительная скорость проскальзывания при работе на ГЖС

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

$\Delta H_{\text{стГЖС}}$ — статический напор при работе на ГЖС.

Как видно из табл. 2, это значение можно снизить в несколько раз. Но так как определить статический напор при работе на ГЖС существенно сложнее, чем при работе на воде без газа, в методике расчета использована формула (1), а выражение (2) имеет информативный характер.

ЛМК сепарации без учета физико-химических свойств. Этот коэффициент определяется отношением величины изменения статического напора на локальном участке к средней скорости течения РЖ

$$m_s = \frac{\Delta H_{\text{ст}}}{\Delta S} \frac{1}{\nu_m}. \quad (3)$$

По сути, этот коэффициент несет всю полную информацию, необходимую для разработки новой ступени.

При разработке новых мультифазных осевых шнековых ступеней в соответствии с данными, приведенными в табл. 1 и 2, можно ориентироваться на значения в диапазоне $33,3 \leq m_s \leq 35,0$.

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

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

При изменении частоты вращения ротора ЛМК быстроходности не меняется.

Тогда ЛМК сепарации без учета физико-химических свойств

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

а относительная скорость проскальзывания одиночного пузырька

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

С увеличением частоты вращения ротора сепарирующие свойства возрастают. Относительная скорость проскальзывания и ЛМК сепарации пропорциональны частоте вращения ротора.

При разработке новых мультифазных осевых шнековых ступеней согласно данным, приведенным в табл. 1 и 2, можно ориентироваться на значения в диапазоне $8,0 \leq n_m \leq 8,8$.

Значения ЛМК сепарации m_s , k_{ms} и быстроходности n_m объективны и однозначно определяют геометрические параметры проточной части (рис. 1).

Полный напор ступени, который равен статическому напору, вычисляется как

$$H = \eta_{\text{г}} \frac{u_{\text{ср}2} c_{u2}}{g},$$

где $\eta_{\text{г}}$ — гидравлический коэффициент полезного действия (КПД); $u_{\text{ср}2}$ — средняя окружная скорость шнека на выходе; c_{u2} — окружная составляющая абсолютной скорости потока на выходе из шнека.

Статический напор шнека

$$H_{\text{стПК}} = \frac{\eta_{\text{г}}}{g} \left(u_{\text{ср}2} c_{u2} - \frac{c_{u2}^2}{2} \right).$$

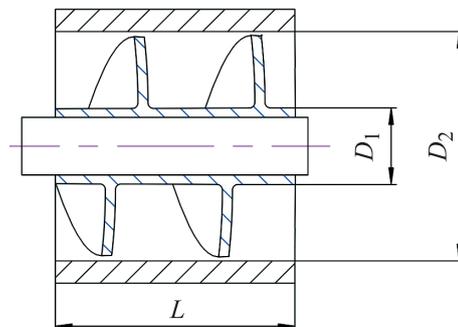


Рис. 1. Эскиз проточной части шнека:
 D_1 и D_2 — диаметр шнека и его втулки;
 L — длина шнека

ЛКСН. Этот коэффициент определяется выражением

$$n_{с.н.л} = \frac{n\sqrt{Q}}{H_{ст}^{3/4}}.$$

ЛКСН отличается от ЛМК быстроходности ступени тем, что вместо напора ступени использована величина изменения статического напора на локальном участке: отдельно в РК, направляющем аппарате, на характерном участке РК или направляющего аппарата.

По аналогии с ЛМК быстроходности ступени при изменении скорости вращения ротора ЛКСН остается неизменным.

Для РК, по сути, ЛКСН определяет коэффициент реакции (реактивности) [16, 25, 26]

$$\rho = \frac{H_T - H_{стРК}}{H_T} = 1 - \frac{c_{u2}}{2u_2},$$

где H_T — теоретический напор; $H_{стРК}$ — статический напор РК; u_2 — окружная скорость шнека на выходе.

Для мультифазных ступеней он может быть меньше, чем для традиционных ступеней, которые имеют тот же коэффициент быстроходности.

При разработке новых мультифазных осевых шнековых ступеней согласно данным, приведенным в табл. 1, можно ориентироваться на значения в диапазоне $110 \leq n_{с.н.л} \leq 120$.

Видно, что для разработки новой мультифазной ступени нужно знать два параметра: ЛКСН и ЛМК быстроходности. Первый коэффициент определяет рекомендованный перепад статического напора на границах локального участка, второй — детальное распределе-

ние геометрических параметров проточной части внутри этого участка. Оба коэффициента позволяют определять геометрические размеры проточной части РК.

Выражения для ЛМК и ЛКСН мультифазных ступеней выведены при номинальном режиме работы. Пример расчета ЛМК быстроходности при номинальной подаче (а не при оптимальной) приведен в работе [26].

Следует отметить, что вследствие уменьшения ЛКСН РК снижается коэффициент быстроходности ступени в целом. При разработке новых мультифазных ступеней можно ориентироваться на данные, приведенные в табл. 1.

Напорные характеристики новой мультифазной осевой ступени и ее лучшего серийного аналога при работе на воде и ГЖС приведены на рис. 2, где $H_{отн}$ — относительный напор ступени, $H_{отн} = H/H_{ном.н.ст}$ (H — напор ступени; $H_{ном.н.ст}$ — напор ступени при номинальном расходе РЖ).

Расчет новой проточной части шнека осевой ступени. ЛМК сепарации m_s имеет значение, рекомендованное в статье [10], как у лучшей серийной осевой мультифазной ступени. Однако ЛКСН уменьшено на 11 % (со 132 до 119), оставаясь в рамках существующих радиальных габаритных размеров и длины. Причем напор при работе на жидкости увеличился на 15 %.

Чтобы сохранить значение ЛМК сепарации m_s , меридианная скорость в соответствии с формулой (3) повышена на 15 % путем уменьшения площади сечения проточной части, увеличения толщины лопастей шнека и изменения диаметров.

Рекомендованное отношение диаметра шнека D_2 к его длине L (см. рис. 1) составляет 1,7. При таком отношении можно избежать заметных изменений среднего диаметра пузырьков СГ, связанных с сепарацией при прохождении через проточную часть РК.

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

Анализ результатов сравнительных испытаний осевых мультифазных ступеней. В новой ступени теоретический напор РК повышен путем увеличения хода шнека и угла лопастей на его выходе. Повышение меридианной скорости потока и ширины лопастей шнека привело к незначительному снижению гидравлического

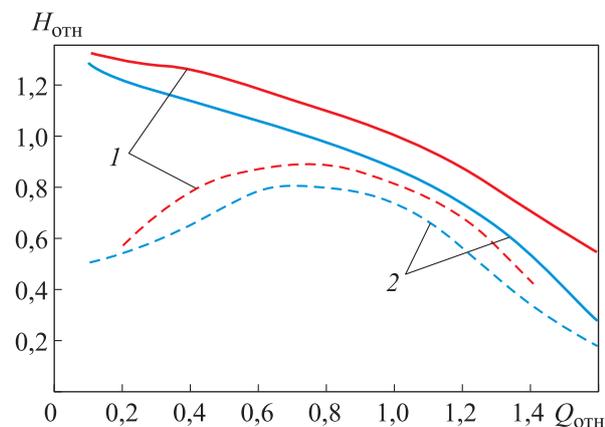


Рис. 2. Напорные характеристики новой (1) и серийной (2) ступеней при работе на воде (сплошные линии) и ГЖС (штриховые линии)

КПД вследствие увеличения потерь на трение и вихреобразование.

Анализ напорных характеристик (см. рис. 2) показал, что для новой ступени деградация напора при работе на ГЖС относительно напора при работе на воде без газа составляет 25 %, а для серийной — 20 %. Однако у новой ступени напор при работе на ГЖС на 10 % выше, чем у серийной. Более высокая деградация напора обусловлена тем, что происходит сепарация пузырьков СГ при их движении вдоль проточной части с повышением концентрации на малых радиусах и увеличением среднего диаметра. Причем, согласно формулам (1) и (2), увеличивается относительная скорость проскальзывания и снижается теоретический напор.

Как следует из табл. 2, при работе на ГЖС относительная скорость проскальзывания в несколько раз меньше, чем при движении одиночного пузырька газа в проточной части лопастного ЭЦН. При малом расходе относительная скорость на ГЖС меньше почти в 7 раз. Также меньше разность относительных скоростей при работе в номинальном режиме и на границах рабочего диапазона. При работе на

ГЖС максимальная разность составляет 2,1, а при работе на воде без газа — 2,8. Повышение относительной скорости проскальзывания приводит к снижению площади проточной части, увеличению скорости течения жидкой фазы и, соответственно, к снижению напора. В результате поток ГЖС стремится сохранить значение ЛМК сепарации за счет соответствующего снижения напора.

Выводы

1. Предложены уточненные коэффициенты и соотношения геометрических размеров, составляющие основу методики, позволяющей разрабатывать мультифазные ступени с высоким напором при работе на воде и ГЖС.

2. Даны рекомендации по выбору значений коэффициентов, используемых при разработке новых осевых шнековых мультифазных ступеней.

3. Приведен пример разработки новой шнековой осевой мультифазной ступени с повышенным напором при работе на воде без газа и 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] Trulev A., Verbitsky V., Timushev S.F. 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., Timushev S.F., 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>
- [14] Trulev A., Kayuda M., Timushev S.F. 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>
- [15] 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>
- [16] Пфлейдерер К. *Лопаточные машины для жидкостей и газов*. Москва, Машгиз, 1960. 683 с.
- [17] 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>
- [18] 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>
- [19] 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>
- [20] 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>
- [21] Соу С. *Гидродинамика многофазных систем*. Москва, Мир, 1971. 536 с.
- [22] Ляпков П.Д. Движение сферической частицы относительно жидкости в межлопаточном канале рабочего колеса центробежного насоса. *Труды МИНХ и ГП*, 1977, № 129, с. 3–36.
- [23] Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. *Гидравлика газожидкостных систем*. Москва-Ленинград, Госэнергоиздат, 1958. 232 с.
- [24] 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
- [25] Подвидз Л.Г., ред. *Методическое пособие по расчету шнеко-центробежной ступени насоса*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1975. 64 с.
- [26] Овсянников Б.В., Чебоевский В.Ф. *Высокооборотные лопаточные насосы*. Москва, Машиностроение, 1975. 336 с.

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.]. Almeteyevsk, AGNI Publ., 2019. 104 p. (In Russ.).
- [5] Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefti* [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 opytно-promyshlennoye vnedreniye pogruzhnykh UETsN kontseptualno novoy konstruksii dlya ekspluatatsii malodebitnykh skvazhin s vysokim sodержaniem 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 razvitiye 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 vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroeniye* [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] Trulev A., Verbitsky V., Timushev S.F. 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., Timushev S.F., 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>
- [14] Trulev A., Kayuda M., Timushev S.F. 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>
- [15] 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>
- [16] Pfeleiderer C. *Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase*. Springer, 1961. 622 p. (Russ. ed.: *Lopatochnyye mashiny dlya zhidkostey i gazov*. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 683 p.)

- [17] 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>
- [18] 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>
- [19] 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>
- [20] 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>
- [21] Soo S. *Fluid dynamics of multiphase systems*. Blaisdell, 1967. 524 p. (Russ. ed.: *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem*. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.)
- [22] 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.).
- [23] Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidravlika gazozhidkostnykh sistem* [Hydraulics of gas-liquid systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. 232 p. (In Russ.).
- [24] 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.).
- [25] 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.).
- [26] Ovsyannikov B.V., Cheboevskiy V.F. *Vysokooborotnye lopatochnye nasosy* [High-speed vane pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 336 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.03.2025

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 «Ракетные двигатели». 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, 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).

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 Sergey Fedorovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines. 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).

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

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

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

KLIPOV Aleksandr Valeryevich — Head of the Department of Pumping Equipment Development. Rimera-Alnas LLC (423450, Almetevsk, Tatarstan, Russian Federation, Surgutskaya 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 осевых шнековых ступеней с использованием мультифазных коэффициентов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 9, с. 76–85.

Please cite this article in English as:

Trulev A.V., Timushev S.F., Lomakin V.O., Schmidt E.M., Klipov A.V. Improving flow path of the axial screw stages using the multiphase coefficients. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 9, pp. 76–85.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие Л.Д. Мальковой**

**«Основы проектирования
режущих инструментов.
Модуль 1»**

Направлено на содействие в закреплении и расширении знаний, полученных при изучении лекционного курса «Основы проектирования режущих инструментов». Включает в себя большой объем иллюстративного и справочного материала, ссылок на нормативные документы, пояснений и примеров, способствующих лучшему пониманию и усвоению программы дисциплины. Освещает первую часть курса, в которую вошли четыре базовых раздела: понятийный аппарат, инструментальные материалы, базирование и базовые поверхности и резцы.

Будет полезно при выполнении курсовых проектов по проектированию режущих инструментов, решении профессиональных задач в рамках НИР и дипломного проектирования.

Для студентов, обучающихся по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» по специализации «Проектирование инструментальных комплексов в машиностроении».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>