

УДК 622.323; 621.6.078

doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-73-84

Конструктивные особенности лопастных решеток рабочих колес, перекачивающих газожидкостные смеси, позволяющие снизить объем газовых каверн

А.В. Трулев¹, В.О. Ломакин², И.В. Клиндух²,
В.С. Удовицкий², С.Ф. Тимушев³

¹ АО «Римера»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

³ Московский авиационный институт

Design Features of Impeller Vane Cascades to Pump Gas and Liquid Mixtures Conducive to Reducing Gas Cavern Magnitudes

A.V. Trulev¹, V.O. Lomakin², I.V. Klindukh²,
V.S. Udovitskiy², S.F. Timushev³

¹ Rимера JSC

² Bauman Moscow State Technical University

³ Moscow Aviation Institute

Методами численного моделирования исследовано влияние конструктивных особенностей лопастных решеток рабочих колес центробежного насоса, перекачивающих газожидкостные смеси, на объем газовых каверн. Получена математическая модель многофазного течения несжимаемой жидкости. Проведены гидродинамические расчеты конструктивных вариантов лопастных решеток рабочих колес. Выявлены области локальной сепарации газа в серийно выпускаемых и усовершенствованных решетках, которые могут привести к образованию газовых пробок и срыву подачи центробежного насоса. Изучено влияние угла атаки, подачи и градиента давления, сквозных отверстий и поперечных вырезов для однорядной лопастной решетки на объем газовой каверны. Рассмотрены конструктивные особенности многоярусных лопастных решеток. Исследовано влияние длины и равномерности распределения лопастей по проточной части многоярусной лопастной системы на объем газовых каверн. Выбрана оптимальная конструкция лопастной решетки для мультифазных рабочих колес.

Ключевые слова: численное моделирование, лопастные решетки рабочих колес, газожидкостные смеси, газовые каверны, образование газовых пробок, многоярусная лопастная решетка

We employed numerical simulation methods to investigate how design features of impeller vane cascades in a centrifugal pump processing gas and liquid mixtures will affect the magnitude of gas caverns. We derived a mathematical model for multiphase flow of incompressible fluid. We performed hydrodynamic computations for various impeller vane cascade designs. We identified regions of local gas separation in commercially available and improved cascades that may result in gas plug formation and pump failure. The paper investigates the effect of the following parameters on the magnitude of a gas cavern: the angle of attack, pressure feed, pressure gradient, and the presence of through holes and transverse cutouts

in a single-tier vane cascade. We consider design features of stacked van cascades and investigate how the vane length and vane distribution uniformity in the blading section of a stacked vane system affect gas cavern magnitudes. We selected the optimum vane cascade design for multiphase impellers.

Keywords: numerical simulation, impeller vane cascades, gas and liquid mixtures, gas-filled caverns, gas plug formation, stacked vane cascade

Согласно формуле Дарси — Вейсбаха, приток из скважины пластовой жидкости, нефти пропорционален перепаду давления, депрессии на пласт. При снижении забойного давления повышается содержание свободного газа (СГ) и механических примесей в газожидкостной смеси (ГЖС) на входе в центробежный насос (далее насос) [1–3].

Необходимо новое оборудование, способное работать в сложных условиях эксплуатации [4–6].

Содержание СГ в ГЖС определяется как отношение объемного расхода газа к объемному расходу смеси. При достаточно высоком содержании СГ в ГЖС проточные каналы ступеней насоса забиваются газом, газовые каверны (ГК) существенно меняют структуру потока в лопастной решетке рабочего колеса, вследствие чего большая часть энергии расходуется не на повышение давления, а переходит в гидравлические потери.

Допустимое содержание СГ в ГЖС должно соответствовать работе насоса без значительной деградации и колебаний параметров, так как эти колебания приводят к повышенному уровню вибрации и, как следствие, к снижению его наработки.

Конструкции изделий для работы в условиях высокого содержания СГ приведены в трудах [7–13], вопросы течения потока в лопастных решетках — в публикациях [14–19]. Например, сквозные отверстия на входе в рабочее колесо улучшают работу мультифазных ступеней [20].

В работах [21–40] исследование течения жидкой и мультифазной сред проведено численными методами. Можно выделить исследования, описанные в статье [22], как наиболее близкие к теме настоящей работы.

Согласно результатам эксперимента и данным, приведенным в публикациях [4, 5], допустимое значение содержания СГ в ГЖС на входе в насос зависит от дисперсности ГЖС, объема ГК, режима работы и конструкции насоса.

Давление на входе в насос и пеннотность можно рассматривать лишь как параметры, влияющие на объем ГК, которая является определяющим фактором надежной работы мультифазных ступеней. Лопастная решетка должна обеспечивать диспергирование потока ГЖС, поддержание минимального объема ГК не только на входе в насос, но во всей его проточной части.

Цель работы — выявление особенностей конструкции лопастных решеток, влияющих на образование и снижение объема ГК, чтобы совершенствовать проточную часть мультифазных ступеней.

Математическая модель. Использована модель многофазного течения несжимаемой жидкости. Численное моделирование базировалось на решении дискретных аналогов базовых уравнений гидродинамики.

Расчет проведен на основе математической модели разделенного многофазного течения несжимаемой жидкости, т. е. для каждой фазы отдельно решались уравнения переноса массы и количества движения, но поле давления оставалось единым для всех фаз [28–31].

Математическая модель включала в себя следующие дифференциальные и алгебраические уравнения.

Объем i -й фазы в каждой расчетной ячейке

$$V_i = \int_V \alpha_i dV,$$

где α_i — концентрация i -й фазы в ячейке; V — объем расчетной ячейки.

Сумма концентраций всех фаз в ячейке

$$\sum_i^n \alpha_i = 1.$$

Уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i \rho_i dV + \int_A \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i dA = 0,$$

где ρ_i — плотность i -й фазы; A — площадь поверхности ячейки; \mathbf{v}_i — вектор скорости

i-й фазы (в случае моделирования турбулентного течения потока моделью типа RANS, с осреднением по времени).

Уравнение изменения количества движения

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i dV + \int_A \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i d\mathbf{a} = - \int_V \alpha_i \nabla p dV + \int_V \alpha_i \rho_i \mathbf{g} dV + \int_A [\alpha_i (\mathbf{T}_i + \mathbf{T}_i^t)] d\mathbf{a} + \int_V \mathbf{M}_i dV.$$

Здесь $\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i$ — тензорное произведение векторов скоростей *i*-й фазы; *p* — давление; **g** — вектор интенсивности массовых сил (в данном случае силы тяжести, равной 9,81 м/с², и силы инерции от вращения расчетной области); **T_i** — тензор напряжений молекулярной вязкости; **T_i^t** — тензор турбулентных напряжений; **M_i** — вектор, характеризующий все силы, которыми отдельные фазы взаимодействуют между собой,

$$\mathbf{M}_i = \sum_{i \neq j} (\mathbf{F}_{ij}^D + \mathbf{F}_{ij}^{VM} + \mathbf{F}_{ij}^L + \mathbf{F}_{ij}^{TD} + \mathbf{F}_{ij}^{WL}),$$

где **F_{ij}^D** — сила сопротивления; **F_{ij}^{VM}** — сила виртуальной массы; **F_{ij}^L** — подъемная сила; **F_{ij}^{TD}** и **F_{ij}^{WL}** — сила, вызванная турбулентной дисперсией и пристенными эффектами соответственно.

Сила сопротивления. При моделировании течения непрерывной *i* и дисперсной *j* сред сила сопротивления, действующая на вторую среду со стороны первой, имеет вид

$$\mathbf{F}_{ij}^D = A_D \mathbf{v}_r,$$

где *A_D* — линеаризованный коэффициент сопротивления; **v_r** — относительная скорость одной среды относительно другой.

Линеаризованный коэффициент сопротивления

$$A_D = 0,5 C_D \rho_c |\mathbf{v}_r| \frac{a_{cd}}{4},$$

где *C_D* — коэффициент сопротивления; ρ_c — плотность непрерывной фазы; *a_{cd}* — площадь взаимодействия фаз (в рассматриваемом случае *a_{cd}*/4 представляет собой площадь проекции сферической частицы на плоскость).

Коэффициент сопротивления

$$C_D = f_D C_{D\infty}.$$

Здесь *f_D* — коэффициент, учитывающий концентрацию частиц; *C_{D∞}* — коэффициент сопротивления одиночной сферической частицы, движущейся в безграничном потоке,

$$C_{D\infty} = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} (1 + 0,15 Re_d^{0,687}) & \text{при } Re_d < 1000; \\ 0,44 & \text{при } Re_d > 1000, \end{cases}$$

где *Re_d* — число Рейнольдса,

$$Re_d = \frac{\rho_c |\mathbf{v}_r| l}{\mu_c}$$

(*l* — характерная длина взаимодействия или размер пузыря; μ_c — динамический коэффициент вязкости непрерывной среды).

Коэффициент, учитывающий концентрацию частиц, определяется выражением

$$f_D = \alpha_c^{n_D},$$

где α_c — концентрация непрерывной фазы; *n_D* = −8,3 для сферической частицы.

Сила виртуальной массы. Инерция окружающей жидкости влияет на ускорение погруженной в нее частицы. Этот эффект моделируют добавлением массы к диспергированной частице.

Сила виртуальной массы, действующей на *i*-фазу, движущуюся ускоренно относительно *j*-й фазы, определяется выражением

$$\mathbf{F}_{ij}^{VM} = C_{VM} \rho_c \alpha_c (\mathbf{a}_j + \mathbf{a}_i),$$

где *C_{VM}* — коэффициент виртуальной массы для сферической частицы, *C_{VM}* = 0,5; **a_j** и **a_i** — ускорение *j*-й и *i*-й фазы соответственно.

Подъемная сила. Если окружающий диспергированную частицу поток неоднороден или завихрен, то на нее действует сила, перпендикулярная относительной скорости:

$$\mathbf{F}_{ij}^L = C_L \rho_c \alpha_d [\mathbf{v}_r \times (\nabla \times \mathbf{v}_c)],$$

где *C_L* — коэффициент подъемной силы, *C_L* = 0,25; **v_c** — скорость непрерывной фазы; α_d — концентрация дисперсной фазы.

Сила, вызванная турбулентной дисперсией. Дополнительное изменение концентрации фаз, вызванное турбулентностью потока, моделируют как силу турбулентной дисперсии

$$\mathbf{F}_{ij}^{TD} = A_D \mathbf{v}_{TD}.$$

Здесь *A_D* — коэффициент силы сопротивления; **v_{TD}** — относительная скорость скольжения,

$$\mathbf{v}_{TD} = \mathbf{D}_{TD} \left(\frac{\nabla \alpha_d}{\alpha_d} - \frac{\nabla \alpha_c}{\alpha_c} \right),$$

где **D_{TD}** — тензор турбулентной диффузии,

$$\mathbf{D}_{TD} = C_0 \frac{v_c^t}{\sigma_\alpha} \mathbf{I}$$

($C_0 = 1$; v_c^t — кинематический коэффициент турбулентной вязкости; σ_α — турбулентное число Прандтля; \mathbf{I} — единичный тензор).

Турбулентное число Прандтля

$$\sigma_\alpha = \sigma_0 \sqrt{1 + C_\beta \xi^2} \frac{1 + \eta}{b + \eta}.$$

Здесь σ_0 — немодифицированное турбулентное число Прандтля, $\sigma_0 = 1$; C_β — корректирующий коэффициент, $C_\beta = 1,8$; ξ — скорость скольжения частицы, отнесенная к скорости турбулентных флуктуаций; η — время взаимодействия частицы, отнесенное ко времени релаксации, $\eta = \tau_I / \tau_R$; b — коэффициент отношения ускорений непрерывной/дисперсной фазы,

$$b = \frac{1 + C_{VM}}{\rho_d / \rho_c + C_{VM}};$$

где ρ_d — плотность дисперсной фазы; τ_I — характерное время взаимодействия частицы и турбулентного вихря; τ_R — время релаксации частицы.

Характерное время взаимодействия частицы и турбулентного вихря

$$\tau_I = \frac{\tau_T}{\sigma_0} \frac{1}{\sqrt{1 + C_\beta \xi^2}};$$

$$\tau_T = \frac{2}{3} C_\mu \frac{k_c}{\epsilon_c},$$

где C_μ — эмпирический коэффициент учета вязкости; k_c — кинетическая энергия турбулентности непрерывной фазы; ϵ_c — скорость диссипации энергии турбулентности непрерывной фазы.

Время релаксации частицы

$$\tau_R = \tau_D \left(1 + \frac{\rho_c}{\rho_d} C_{VM} \right),$$

где τ_D — характерный масштаб времени для дисперсной частицы,

$$\tau_D = \frac{\rho_d d^2}{18 \mu_c}.$$

Скорость скольжения частицы, отнесенная к скорости турбулентных флуктуаций, определяется выражением

$$\xi = \frac{|\mathbf{v}_r|}{\sqrt{2/3} k_c}.$$

Сила, вызванная пристенными эффектами. Находясь вблизи твердой стенки, пузырь газа испытывает несимметричное воздействие со стороны жидкости. Сила, приходящаяся на единицу объема пузыря газа, определяется выражением

$$\mathbf{F}_{ij}^{WL} = -C_{WL} y_w \alpha_d \rho_c \frac{|\mathbf{v}_{r\tau}|^2}{d_p} \mathbf{n},$$

где C_{WL} — коэффициент, являющийся функцией расстояния от стенки и убывающий с увеличением расстояния; y_w — расстояние от стенки до центра ячейки; α_d — концентрация дисперсной фазы; $\mathbf{v}_{r\tau}$ — касательная к стенке составляющая относительной скорости; d_p — диаметр пузыря; \mathbf{n} — единичная нормаль к стенке в ближайшей к пузырю точке.

Коэффициент C_{WL} имеет вид

$$C_{WL} = \max \left(C_{w1} + \frac{C_{w2}}{y_w} d_p, 0 \right),$$

где C_{w1} , C_{w2} — коэффициенты, $C_{w1} = -0,01$; $C_{w2} = 0,05$.

Таким образом, сила, вызванная пристенными эффектами, обнуляется на расстоянии, равном около пяти средних диаметров газового пузыря.

Особенностью задания математической модели является многофазность течения потока. На этом этапе моделирования необходимо отдельно задать модель течения жидкости и газа, для чего воспользуемся методом взаимодействия Volume of Fluid.

Основная идея метода Volume of Fluid состоит во введении переменной — относительного объема жидкости f , который содержится в ячейке. Если $f = 1$, то жидкость полностью занимает ячейку, если $f = 0$, то ее занимает газовая фаза (или вакуум, если газовую фазу не рассматривают). Если $0 < f < 1$, то ячейка содержит свободную поверхность. Для переменной f решают уравнение баланса массы в ячейке

$$\frac{df}{dt} + \nabla V f = 0.$$

Для расчета смоделирована проточная часть насоса. Трехмерная сетка состояла из 810 000 ячеек. В ядре потока ячейки имели многогранную форму, у твердых стенок проточной части — призматическую.

Для вычислений использован программный пакет StarCCM. В качестве поверхностной сет-

ки была импортирована ранее построенная геометрия проточной части.

В качестве физической модели приняты следующие параметры:

- многофазное взаимодействие, масштаб длины взаимодействия 0,1 мм;
- фазы — вода и воздух;
- начальное распределение жидкость/газ — 1/0;
- заданное на входе полное давление равно нулю.

Анализ конструктивных схем. Исследования проведены методом численного моделирования на конструктивно схожих моделях насосов с коэффициентом быстроходности $n_s \approx 90$ для грубодисперсной ГЖС.

Исследование влияния угла атаки, подачи насоса и градиента давления, сквозных отверстий и поперечных вырезов, сделанных в лопастях однорядной лопастной решетки, на объем ГК.

Результаты исследования влияния угла атаки на объем ГК при содержании СГ в ГЖС на входе в насос (далее содержание СГ в ГСЖ) $V_{СГ} = 3\%$ приведены на рис. 1. Численное моделирование выполнено при различных значениях угла атаки: $\alpha = -4, -3, -2, -1$ и 0° .

На рис. 1, д показано течение потока ГЖС с плавным входом в однорядную лопастную решетку. На входе ГК нет, они возникают на средней и периферийной части лопастной решетки.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что при плавном входе потока на лопасти однорядной решетки ГК смещаются от центра к периферии.

Результаты исследования влияния угла атаки на объем ГК при увеличенной подаче насоса, пониженном градиенте давления и содержании СГ в ГСЖ $V_{СГ} = 3\%$ приведены на рис. 2. Численное моделирование выполнено при тех значениях угла атаки, что и в предыдущем случае.

По сравнению с вариантами, показанными на рис. 1, подача рабочего потока увеличена, соответственно, снижен градиент давления. На рис. 2, г показано течение с плавным входом потока ГЖС в однорядную лопастную решетку. Совокупность факторов — увеличение скорости, снижение роста давления и плавный вход потока в лопастную решетку — позволили уменьшить объем ГК в проточной части. Относительно небольшие ГК возникают в средней части лопастной решетки.

Анализ данных, полученных при численном моделировании, показал, что при плавном входе потока на лопасти однорядной решетки, при увеличении подачи и снижении градиента давления объем ГК уменьшается на всей длине лопастной решетки.

Результаты исследования влияния сквозных отверстий и поперечных вырезов, сделанных в лопастях однорядной лопастной решетки, при угле атаки $\alpha = 5^\circ$ и содержании СГ в ГСЖ $V_{СГ} = 3\%$ приведены на рис. 3.

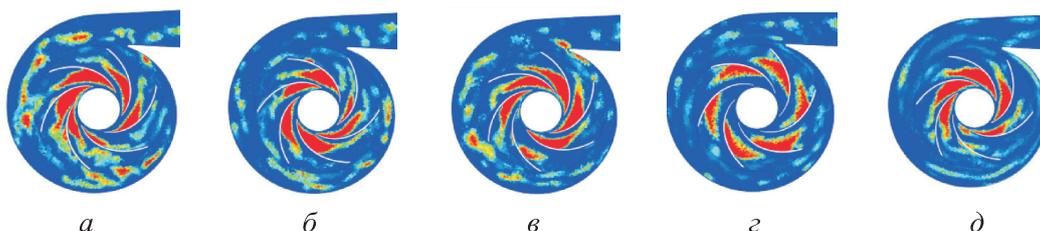


Рис. 1. Результаты исследования влияния угла атаки на объем ГК при содержании СГ в ГСЖ $V_{СГ} = 3\%$:
а — $\alpha = -4^\circ$; б — $\alpha = -3^\circ$; в — $\alpha = -2^\circ$; г — $\alpha = -1^\circ$; д — $\alpha = 0^\circ$

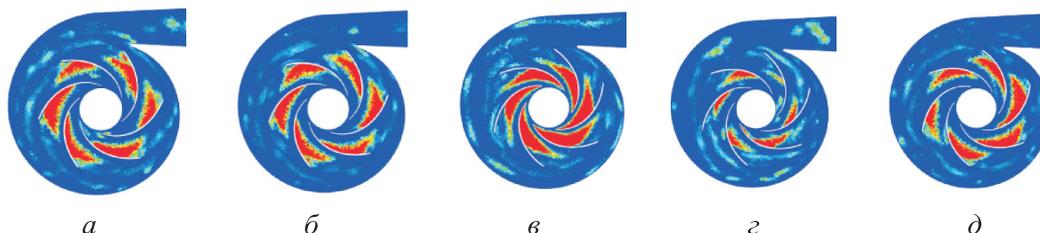


Рис. 2. Результаты исследования влияния угла атаки на объем ГК при увеличенной подаче насоса, пониженном градиенте давления и содержании СГ в ГСЖ $V_{СГ} = 3\%$
а — $\alpha = -4^\circ$; б — $\alpha = -3^\circ$; в — $\alpha = -2^\circ$; г — $\alpha = -1^\circ$; д — $\alpha = 0^\circ$

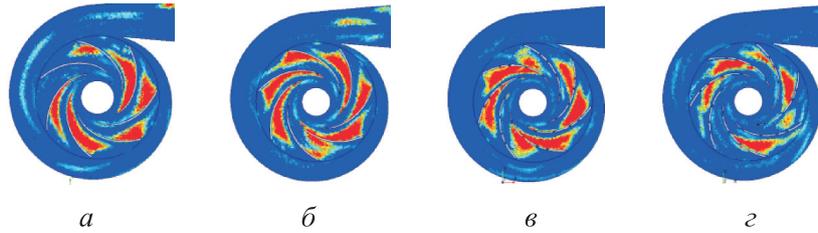


Рис. 3. Результаты исследования влияния сквозных отверстий и поперечных вырезов, сделанных в лопастях однорядной лопастной решетки, на объем ГК при угле атаки $\alpha = 5^\circ$ и содержании СГ в ГЖС $V_{СГ} = 3\%$: а — сплошные лопасти, б — лопасти со сквозными отверстиями на входе, в — лопасти со сквозными отверстиями по всей длине; г — лопасти с поперечными разрезами по всей длине

Для этой серии численных экспериментов определяли коэффициент полезного действия и напор при работе на ГЖС. Сквозные отверстия на входе в лопасть (рис. 3, б) позволили увеличить напор на 4,2 %, сквозные отверстия по всей длине лопасти (рис. 3, в) — на 8,6 %, поперечные разрезы, равномерно сделанные по всей длине лопасти (рис. 3, г), — на 17,3 %. Соответственно, увеличился и коэффициент полезного действия. При этом уменьшился объем ГК.

Анализ полученных данных позволяет заключить следующее:

- сквозные отверстия и поперечные вырезы в лопастях однорядной решетки обеспечивают снижение объема ГК;

- поперечные вырезы по всей длине лопасти однорядной решетки предпочтительнее, чем сквозные отверстия.

Исследование влияния длины и равномерности распределения лопастей в проточной части многоярусной лопастной системы на объем ГК при содержании СГ в ГЖС $V_{СГ} = 3\%$. Анализ результатов исследования (рис. 4) позволяет заключить, что многоярусная лопастная решетка с равномерным распределением лопастей в проточной части и с укороченными лопастями на входе позволяет уменьшить объем ГК, сделать распределение газовой фазы в проточной части более равномерным по сравнению с однорядными решетками.

Исследование влияния содержания СГ в ГЖС на объем ГК. Численное моделирование проведено при содержании СГ в ГЖС $V_{СГ} = 4$ и 6 % (рис. 5).

Геометрические характеристики лопастной решетки, приведенной на рис. 5, совпадают с показанной на рис. 4, в. Как видно из рис. 5, при увеличении содержания СГ в ГЖС укороченные на входе лопасти не создают ГК, обеспечивают равномерное распределение газовой фазы в проточной части. ГК начинают образовываться на относительно длинных лопастях в центре и на периферии.

Для снижения объема ГК при высоком содержании СГ в ГЖС предлагается исследовать возможность снижения длины лопастей и их более равномерное распределение в проточной части.

Выводы

1. Проведено исследование влияния конструктивных особенностей лопастных решеток рабочих колес насоса, перекачивающих ГЖС, на объем ГК, по результатам которого выявлено следующее:

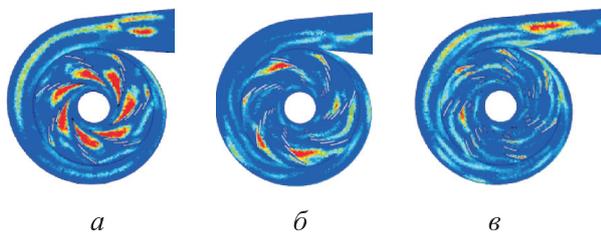


Рис. 4. Результаты исследования влияния длины и равномерности распределения лопастей в проточной части на объем ГК при содержании СГ в ГЖС $V_{СГ} = 3\%$:

а — лопасти одинаковой длины, установлены сосредоточенно; б — лопасти на входе укорочены, разделены на три части; в — лопасти установлены более равномерно путем поворота относительно центра рабочего колеса

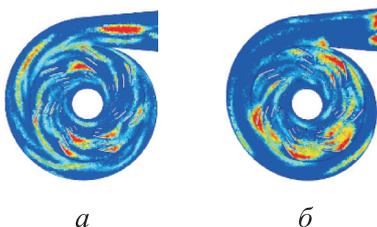


Рис. 5. Результаты исследования влияния содержания СГ в ГЖС на объем ГК: а — $V_{СГ} = 4\%$; б — $V_{СГ} = 6\%$

- при плавном входе потока на лопасти однорядной решетки ГК смещаются от центра к периферии;

- при плавном входе потока на лопасти однорядной решетки, увеличении подачи насоса и снижении градиента давления ГК уменьшаются на всей длине лопастной решетки.

- сквозные отверстия и поперечные вырезы, сделанные в лопастях однорядной решетки, позволяют снизить объем ГК;

- поперечные вырезы по всей длине лопасти для однорядных решеток предпочтительнее, чем сквозные отверстия.

2. Выбрана оптимальная конструкция лопастной решетки для мультифазных рабочих

колес. Многорядная лопастная решетка с равномерным распределением лопастей в проточной части и укороченными лопастями на входе позволяет уменьшить объем ГК, сделать распределение газовой фазы в проточной части более равномерным по сравнению с традиционными однорядными решетками.

3. Для снижения объема ГК при высоком содержании СГ в ГЖС на входе в насос предлагается исследовать возможность уменьшения длины лопастей в средней части и на периферии и их более равномерное распределение в проточной части по аналогии с лопастями на входе в лопастную решетку.

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, 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] Якимов С.Б., Шпортко А.А., Шалагин Ю.Ю. О путях повышения надежности газосепараторов ЭЦН на месторождениях ПАО «НК «Роснефть». *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*, 2017, № 1, с. 33–39.
- [6] Якимов С.Б. О возможностях оптимизации классов износоустойчивости электроцентробежных насосов на месторождениях. *Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть»*, 2015, № 3, с. 85–92.
- [7] Трулев А.В., Логинов В.Ф., Горбунов С.И. и др. Разработка и опытно-промышленное внедрение погружных УЭЦН концептуально новой конструкции для эксплуатации малодобитных 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.
- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] 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. 59–66.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] Трулев А.В., Шмидт Е.М. Методологические особенности стендовых испытаний газосепараторов установок погружных электроцентробежных насосов для добычи нефти. *Вестник МАИ*, т. 28, № 3, с. 73–80, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-2-73-80>
- [14] Петров В.И., Чебаевский В.Ф. *Кавитация в высокооборотных лопастных насосах*. Москва, Машиностроение, 1982. 192 с.
- [15] Ляпков П.Д. Движение сферической частицы относительно жидкости в межлопаточном канале рабочего колеса центробежного насоса. *Труды МИНХ и ГП*, 1977, № 129, с. 3–36.
- [16] Тимушев С.Ф., Федосеев С.Ю. Определение коэффициента начальной кавитации в центробежном насосе методом вычислительного эксперимента. *Вестник МАИ*, 2012, т. 19, № 2, с. 89–93.
- [17] Яковлев А.А., Тимушев С.Ф., Ципенко А.В. Исследование работы осевого вентилятора в программном комплексе FlowVision. *Вестник МАИ*, 2011, т. 18, № 6, с. 35–38.
- [18] Гордеев В.А., Тимушев С.Ф., Фирсов В.П. и др. Численное исследование поведения жидкости в баках ракет-носителей. *Вестник МАИ*, 2011, т. 18, № 1, с. 47–53.
- [19] Волков М.Г., Зейгман Ю.В. Исследование структуры течения газожидкостной смеси в рабочем колесе электроцентробежного насоса. *Нефтяное хозяйство*, 2021, № 6, с. 90–93.
- [20] Пещеренко М.П., Перельман О.М., Рабинович А.И. и др. Повышение эффективности эксплуатации УЭЦН путем применения мультифазных насосов. *Бурение и нефть*, 2014, № 4, с. 56–60.
- [21] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical study of the performance loss of a centrifugal pump carrying emulsion. *E3S Web Conf.*, 2021, vol. 321, art. 01010, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132101010>
- [22] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical assessment of the hydrodynamic behavior of a volute centrifugal pump handling emulsion. *Entropy*, 2022, vol. 24, no. 2, art. 221, doi: <https://doi.org/10.3390/e24020221>
- [23] Valdés J.P., Asuaje M., Ratkovich N. Study of an ESP's performance handling liquid-liquid flow and unstable O-W emulsions part II: coupled CFD-PBM modelling. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2021, vol. 198, art. 108227, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108227>
- [24] Banjar H., Zhang H.Q. Experiments and emulsion rheology modeling in an electric submersible pump. *Proc. Int. Petroleum Technology Conf.*, 2019, paper IPTC-19463-MS, doi: <https://doi.org/10.2523/iptc-19463-ms>
- [25] Zhu J., Zhu H., Cao G. et al. A new mechanistic model for oil-water emulsion rheology and boosting pressure prediction in electrical submersible pumps ESP. *Proc. SPE Annual Technical Conf. and Exhibition*, 2019, paper SPE-196155-MS, doi: <https://doi.org/10.2118/196155-ms>
- [26] Zhu J., Zhu H., Cao G. et al. A new mechanistic model to predict boosting pressure of electrical submersible pumps ESPs under high-viscosity fluid flow with validations by experimental data. *Proc. SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symp.*, 2019, paper SPE-194384-MS, doi: <https://doi.org/10.2118/194384-ms>
- [27] Zhang M., Dabirian R., Mohan R.S. et al. Effect of shear and water cut on phase inversion and droplet size distribution in oil-water flow. *J. Energy Resour. Technol.*, 2019, vol. 141, no. 3, art. 032905, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4041661>
- [28] Lomakin V.O., Chaburko P.S., Kuleshova M.S. Multi-criteria optimization of the flow of a centrifugal pump on energy and vibroacoustic characteristics. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 176, pp. 476–482, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.347>
- [29] 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>
- [30] Lomakin V.O. Proceedings of 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 2015.

- [31] 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>
- [32] Shargatov V.A., Gorkunov S.V., Il'ichev A.T. Dynamics of front-like water evaporation phase transition interfaces. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2019, vol. 67, pp. 223–236, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.07.006>
- [33] Arefyev K.Y., Prokhorov A.N., Saveliev A.S. Study of the breakup of liquid droplets in the vortex wake behind pylon at high airspeeds. *Thermophys. Aeromech.*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 55–66, doi: <https://doi.org/10.1134/S0869864318010055>
- [34] Gousskov A.M., Lomakin V.O., Banin E.P. et al. Minimization of hemolysis and improvement of the hydrodynamic efficiency of a circulatory support pump by optimizing the pump flowpath. *Biomed. Eng.*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 229–233, doi: <https://doi.org/10.1007/s10527-017-9720-9>
- [35] Arefyev K.Y., Voronetsky A.V., Suchkov S.A. et al. Computational and experimental study of the two-phase mixing in gas-dynamic ignition system. *Thermophys. Aeromech.*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 225–237, doi: <https://doi.org/10.1134/S086986431702007X>
- [36] Lomakin V.O., Kuleshovav 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>
- [37] Arefyev K.Y., Voronetsky A.V. Modelling of the process of fragmentation and vaporization of non-reacting liquid droplets in high-enthalpy gas flows. *Thermophys. Aeromech.*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 585–596, doi: <https://doi.org/10.1134/S0869864315050078>
- [38] Belov P.A., Kobets L.P., Borodulin A.S. Impregnation kinetics of fibers with liquids: Simulation within the generalization of Navier-Stokes equations. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 403–406, doi: <https://doi.org/10.1134/S2075113314040182>
- [39] 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>
- [40] Cheremushkin V., Lomakin V., Kalin N. et al. Development and research of a borehole centrifugal pump stage. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 220, vol. 779, art. 012055, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012055>

References

- [1] Drozdov A.N. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi pogrzhnymi nasosami v oslozhnennykh usloviyakh* [The technology and technique of oil production by submersible pumps in the complicated conditions]. Moscow, MAKS Press Publ., 2008. 309 p. (In Russ.).
- [2] Den'gaev A.V. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii skvazhin pogrzhnymi tsentrobezhnymi nasosami pri otkachke gazozhidkostnykh smesey*. Diss. kand. tekhn. nauk [Raising efficiency of well operation by submerged centrifugal pumps at delivering liquid-gas mixture. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, RGU 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 impeller pump settings for oil delivery 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 elektrotsentrobezhnykh ustanovok pri dobyche nefi s vysokim gazosoderzhaniem* [Raising work efficiency of submerged electrocentrifugal pump plants at extracting oil with high gas content]. Al'met'yevsk, AGNI Publ., 2019. 104 p. (In Russ.).
- [5] Yakimov S.B., Shportko A.A., Shalagin Yu.Yu. Ways of improving gas separators reliability used to protect electric centrifugal pumps (ESP) in the deposits of PJSC "NK "Rosneft". *Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex], 2017, no. 1, pp. 33–39. (In Russ.).
- [6] Yakimov S.B. Potential optimization of ESP wear resistance class at Orenburgneft JSC fields. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik OAO «NK «Rosneft»*, 2015, no. 3, pp. 85–92. (In Russ.).

- [7] Trulev A.V., Loginov V.F., Gorbunov S.I. et al. Razrabotka i opytно-promyshlennoe vnedrenie pogruzhnykh UETsN kontseptual'no novoy konstruksii dlya ekspluatatsii malodebitnykh skvazhin s vysokim soderzhaniem svobodnogo gaza i mekhanicheskikh primesey [Development and experimental commercialization of submerged electrocentrifugal pump of conceptually new construction for exploitation of low-debit wells with high free gas and mechanical impurity concentration]. V: *Sbornik rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchno tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitie toplivno-energeticheskoy i dobyvayushchey otrasli* [In: Work collection of laureates of International competition of scientific technical and innovative products dedicated to development of fuel-energy and extractive sector]. Moscow, Format Publ., 2019, pp. 307–310. (In Russ.).
- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] 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. 59–66. (In Russ.).
- [11] 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.).
- [12] 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.).
- [13] Trulev A.V., Shmidt E.M. Bench tests methodological specifics of submersible electric centrifugal pumps gas separating installations for oil extraction. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], vol. 28, no. 3, pp. 73–80, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-2-73-80> (in Russ.).
- [14] Petrov V.I., Chebaevskiy V.F. *Kavitatsiya v vysokooborotnykh lopastnykh nasosakh* [Cavitation in high-speed impeller pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 192 p. (In Russ.).
- [15] Lyapkov P.D. Motion of a spherical particle relative to liquid in intervane channel of a pump impeller. *Trudy MINKh i GP*, 1977, no. 129, pp. 3–36. (In Russ.).
- [16] Timushev S.F., Fedoseev S.Yu. Definition of the incipient cavitation number in a centrifugal pump by computational testing. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2012, vol. 19, no. 2, pp. 89–93. (In Russ.).
- [17] Yakovlev A.A., Timushev S.F., Tsipenko A.V. Study of axial fan in the cae system "FlowWis-ion". *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2011, vol. 18, no. 6, pp. 35–38. (In Russ.).
- [18] Gordeev V.A., Timushev S.F., Firsov V.P. et al. Design basics of aggregates disclosure of centrifugal space systems. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2011, vol. 18, no. 1, pp. 47–53. (In Russ.).
- [19] Volkov M.G., Zeygman Yu.V. Investigating the gas-liquid flow structure in the electrical submersible pump unit's impeller. *Neftyanoe khozyaystvo* [Oil Industry], 2021, no. 6, pp. 90–93. (In Russ.).
- [20] Peshcherenko M.P., Perel'man O.M., Rabinovich A.I. et al. Increase of ESP efficiency. Multiphase pumps application. *Burenie i neft'*, 2014, no. 4, pp. 56–60. (In Russ.).
- [21] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical study of the performance loss of a centrifugal pump carrying emulsion. *E3S Web Conf.*, 2021, vol. 321, art. 01010, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132101010>
- [22] Achour L., Speclin M., Belaidi I. et al. Numerical assessment of the hydrodynamic behavior of a volute centrifugal pump handling emulsion. *Entropy*, 2022, vol. 24, no. 2, art. 221, doi: <https://doi.org/10.3390/e24020221>
- [23] Valdés J.P., Asuaje M., Ratkovich N. Study of an ESP's performance handling liquid-liquid flow and unstable O-W emulsions part II: coupled CFD-PBM modelling. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2021, vol. 198, art. 108227, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108227>

- [24] Banjar H., Zhang H.Q. Experiments and emulsion rheology modeling in an electric submersible pump. *Proc. Int. Petroleum Technology Conf.*, 2019, paper IPTC-19463-MS, doi: <https://doi.org/10.2523/iptc-19463-ms>
- [25] Zhu J., Zhu H., Cao G. et al. A new mechanistic model for oil-water emulsion rheology and boosting pressure prediction in electrical submersible pumps ESP. *Proc. SPE Annual Technical Conf. and Exhibition*, 2019, paper SPE-196155-MS, doi: <https://doi.org/10.2118/196155-ms>
- [26] Zhu J., Zhu H., Cao G. et al. A new mechanistic model to predict boosting pressure of electrical submersible pumps ESPs under high-viscosity fluid flow with validations by experimental data. *Proc. SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symp.*, 2019, paper SPE-194384-MS, doi: <https://doi.org/10.2118/194384-ms>
- [27] Zhang M., Dabirian R., Mohan R.S. et al. Effect of shear and water cut on phase inversion and droplet size distribution in oil-water flow. *J. Energy Resour. Technol.*, 2019, vol. 141, no. 3, art. 032905, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4041661>
- [28] Lomakin V.O., Chaburko P.S., Kuleshova M.S. Multi-criteria optimization of the flow of a centrifugal pump on energy and vibroacoustic characteristics. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 176, pp. 476–482, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.347>
- [29] 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>
- [30] Lomakin V.O. Proceedings of 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 2015.
- [31] 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>
- [32] Shargatov V.A., Gorkunov S.V., Il'ichev A.T. Dynamics of front-like water evaporation phase transition interfaces. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2019, vol. 67, pp. 223–236, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.07.006>
- [33] Arefyev K.Y., Prokhorov A.N., Saveliev A.S. Study of the breakup of liquid droplets in the vortex wake behind pylon at high airspeeds. *Thermophys. Aeromech.*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 55–66, doi: <https://doi.org/10.1134/S0869864318010055>
- [34] Gousskov A.M., Lomakin V.O., Banin E.P. et al. Minimization of hemolysis and improvement of the hydrodynamic efficiency of a circulatory support pump by optimizing the pump flowpath. *Biomed. Eng.*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 229–233, doi: <https://doi.org/10.1007/s10527-017-9720-9>
- [35] Arefyev K.Y., Voronetsky A.V., Suchkov S.A. et al. Computational and experimental study of the two-phase mixing in gas-dynamic ignition system. *Thermophys. Aeromech.*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 225–237, doi: <https://doi.org/10.1134/S086986431702007X>
- [36] Lomakin V.O., Kuleshovav 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>
- [37] Arefyev K.Y., Voronetsky A.V. Modelling of the process of fragmentation and vaporization of non-reacting liquid droplets in high-enthalpy gas flows. *Thermophys. Aeromech.*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 585–596, doi: <https://doi.org/10.1134/S0869864315050078>
- [38] Belov P.A., Kobets L.P., Borodulin A.S. Impregnation kinetics of fibers with liquids: Simulation within the generalization of Navier-Stokes equations. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 403–406, doi: <https://doi.org/10.1134/S2075113314040182>
- [39] 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>
- [40] Cheremushkin V., Lomakin V., Kalin N. et al. Development and research of a borehole centrifugal pump stage. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 220, vol. 779, art. 012055, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012055>

Информация об авторах

ТРУЛЕВ Алексей Владимирович — кандидат технических наук. АО «Римера» (125047, Москва, Российская Федерация, ул. Лесная, д. 5, корп. Б, e-mail: aleksey.trulev@rimera.com).

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

КЛИНДУХ Илья Викторович — магистрант кафедры «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: klinduh_ilya1999@mail.ru).

УДОВИЦКИЙ Владислав Степанович — магистрант кафедры «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: vladislav.engineer@mail.ru).

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Трулев А.В., Ломакин В.О., Клиндух И.В., Удовитский В.С., Тимушев С.Ф. Конструктивные особенности лопастных решеток рабочих колес, перекачивающих газожидкостные смеси, позволяющие снизить объем газовых каверн. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 9, с. 73–84, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-73-84

Please cite this article in English as:

Trulev A.V., Lomakin V.O., Klindukh I.V., Udovitskiy V.S., Timushev S.F. Design Features of Impeller Vane Cascades to Pump Gas and Liquid Mixtures Conducive to Reducing Gas Cavern Magnitudes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 9, pp. 73–84, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-73-84

Information about the authors

TRULEV Alexey Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.). Rimera JSC (125047, Moscow, Russian Federation, Lesnaya St., Bldg. 5B, e-mail: aleksey.trulev@rimera.com).

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

KLINDUKH Ilya Viktorovich — Graduate, 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: klinduh_ilya1999@mail.ru).

UDOVITSKIY Vladislav Stepanovich — Graduate, 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: vladislav.engineer@mail.ru).

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