

УДК 62-986

doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-84-92

Расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование кавитационных характеристик шиберных запорно-регулирующих устройств с внутренним байпасом

В.З. Муфтахов

ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»

Computational, theoretical and experimental study of cavitation characteristics of the gate wellhead devices with the internal bypass

V.Z. Muftakhov

Nizhnevartovsk State University

Гидравлические системы включают в себя регулирующие устройства, которые создают местные сопротивления. Уменьшение или увеличение давления и скорости потока рабочей среды в регулирующих устройствах вызывает кавитацию, вибрацию, шум, разрушение материала, повышение потерь энергии и снижение коэффициента полезного действия, неблагоприятные последствия которых можно уменьшить применением байпаса. Одной из важных задач проектирования регулирующих устройств является определение кавитационных характеристик. Применение внутреннего байпаса в таких устройствах позволяет уменьшить силы на перемещение регулирующих элементов и удельные давления при открытии и закрытии, расположить место схлопывания кавитационных пузырьков в потоке после регулирующих элементов — затворов. Приведены результаты расчетно-теоретического исследования с использованием современного комплекса инженерного анализа и экспериментального определения кавитационных характеристик шиберного запорно-регулирующего устройства с внутренним байпасом.

Ключевые слова: шиберное запорно-регулирующее устройство, внутренний байпас, кавитационные характеристики, коэффициент кавитации

Hydraulic systems include control devices that create local resistance. Decreasing and increasing the working medium pressure and flow rate in the control devices cause cavitation, vibration, noise, material destruction, increase in the energy losses and decrease in the efficiency, which adverse effects could be reduced by using a bypass. One of the important tasks in designing the control devices is establishment of the cavitation characteristics. Introduction of an internal bypass in such devices makes it possible to reduce forces on the control elements displacement and the specific pressures in opening and closing, as well as to locate the cavitation bubbles collapse point in the flow behind the control gates. The paper presents results of a computational theoretical study using a modern complex of engineering analysis and experimental determination of the cavitation characteristics of the gate wellhead device with an internal bypass.

Keywords: pipeline fittings, bypass, hydraulic characteristics, cavitation

Изменение давления и скорости течения потока рабочей среды (РС) в регулирующих устройствах вызывает кавитацию, вибрацию, шум, разрушение материала, повышение потерь энергии и снижение коэффициента полезного действия [1–3], негативные последствия которых можно уменьшить применением байпаса.

Определение кавитационных характеристик — одна из важных задач проектирования регулирующих устройств. Применение внутреннего байпаса в таких устройствах позволяет уменьшить силы на перемещение регулирующих элементов и удельное давление РС при открытии и закрытии, расположить место схлопывания кавитационных пузырьков в потоке после регулирующих элементов — затворов [4].

Цель работы — исследование по повышению точности регулирования шиберного запорно-регулирующего устройства (ШЗРУ) с внутренним байпасом и определение кавитационных характеристик.

Схема ШЗРУ [5] при закрытом положении шибер и заслонки приведена на рис. 1, а, схемы ШЗРУ при закрытом и открытом положениях заслонки — на рис. 1, б и в соответственно.

Открытие ШЗРУ. В закрытом положении ШЗРУ фиксаторы 13 передвинуты в лунки 14 и предотвращают перемещение шибер 7 при передвижении заслонки 4 вверх шпинделем 6. Заслонка открывает входной 2 и выходной 10 каналы в шибере, регулируя расход и перепад давления РС при движении до упора в верхний край выемки 16 и полного открытия канала в шибере. При этом положении лунки 12 в заслонке совпадают с осью фиксаторов. Перепад давления РС на ШЗРУ уменьшается.

Шпиндель продолжает движение вверх, при этом концы фиксаторов скользят по наклонным поверхностям лунок 14 в корпусе 11 и противоположным концом перемещаются в лунки 12, тем самым фиксируя между собой шибер и заслонку. После этого заслонка и шибер как единое целое движутся вверх до полного открытия ШЗРУ.

Закрытие ШЗРУ. Процесс происходит в обратном порядке открытию. Шибер перемещается при сравнительно малых перепаде давления РС, что позволяет уменьшить в 3–5 раз силы на перемещение регулирующих элементов и мощность привода.

Численное исследование проведено в программном комплексе Solidworks 2022 Flow Simulation. Приняты следующие допущения: РС

подчиняется закону вязкого трения; режим течения РС — установившийся, стационарный с учетом кавитации; отсутствует теплообмен между внешней средой и РС; шероховатость всех поверхностей проточной части расчетной области

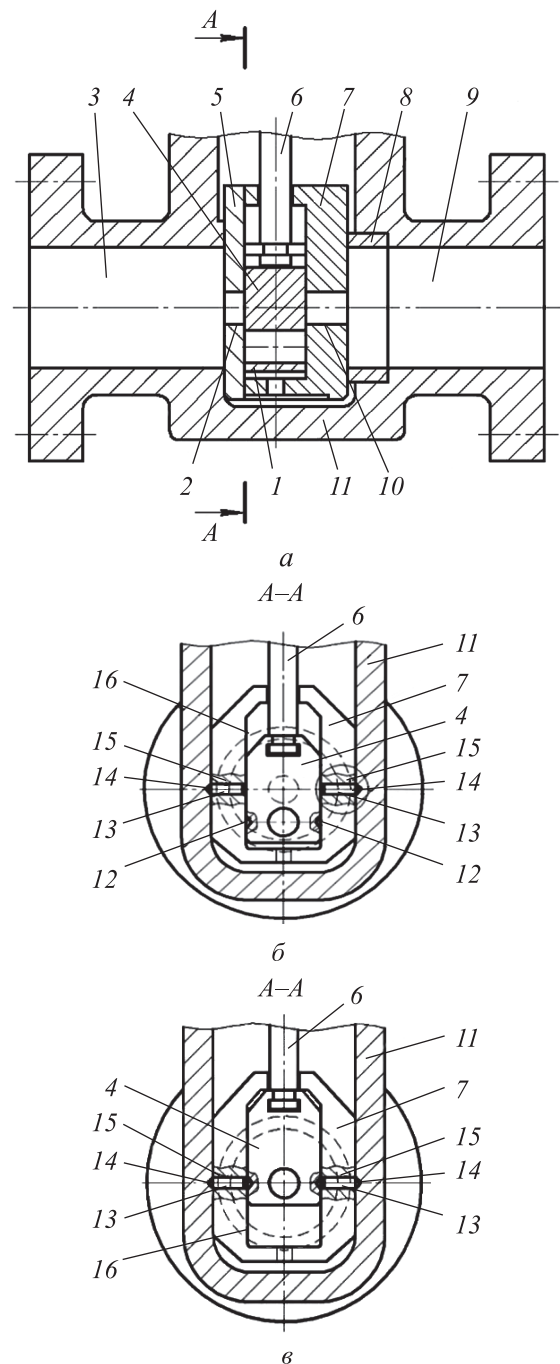


Рис. 1. Схемы ШЗРУ при закрытом положении шибер и заслонки (а), при закрытом (б) и открытом (в) положениях заслонки:

1 — канал в заслонке; 2 и 10 — входной и выходной каналы в шибере; 3 и 9 — входной и выходной патрубки; 4 — заслонка; 5 — плита; 6 — шпиндель; 7 и 16 — шибер и выемка в нем; 8 — седло; 11 — корпус; 12 и 14 — лунки в заслонке и корпусе; 13 и 15 — фиксаторы и отверстия в шибере для них

равна 50 мкм; отсутствует учет допустимого разброса размеров деталей.

В основу математической модели положена система дифференциальных уравнений в частных производных и граничные условия: давление РС на входе в ШЗРУ и на выходе из него (создается перепад давления) [6–8].

Уравнение неразрывности потока РС

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i},$$

где p — давление РС, Па; t — время, с; ρ — плотность РС, кг/м³; u_i — проекция вектора скорости течения потока РС на ось x_i , м/с.

Закон сохранения количества движения РС

$$\frac{\partial p}{\partial t} u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i,$$

где u_j — проекция вектора скорости течения потока РС на ось x_j ; τ_{ij} — тензор напряжений для вязкой жидкости (выражение для тензора включает в себя динамическую вязкость и коэффициент динамического сопротивления), Н/м²; S_i — источник объемных и поверхностных сил, Н/м³.

Трехмерные нестационарные движения вязкой несжимаемой жидкости описываются уравнением Навье — Стокса и неразрывности

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_i}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_i}{\partial y} + v_3 \frac{\partial v_i}{\partial z} = \\ = -\nabla_i P + \nu \left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} \right); \quad (1) \\ \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{\partial v_3}{\partial z} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \end{aligned}$$

где x, y, z — декартовы координаты; v_1, v_2, v_3 — компоненты скорости течения потока РС; P — давление, отнесенное к постоянной плотности и включающее в себя потенциал массовых сил; ν — коэффициент кинематической вязкости.

В уравнении (1):

$$\nabla_1 P = \partial P / \partial x; \quad \nabla_2 P = \partial P / \partial y; \quad \nabla_3 P = \partial P / \partial z.$$

Число кавитации, характеризующее свойства местных сопротивлений регулирующего элемента:

$$k = 2Eu = \frac{2(p_1 - p_{\text{кав}})}{\rho w_1^2}, \quad (2)$$

где Eu — критерий Эйлера; p_1 — абсолютное давление в стационарном потоке РС на входе в

ШЗРУ, $p_1 = p_{\text{атм}} + p_{\text{ман}}$ ($p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; $p_{\text{ман}}$ — манометрическое давление за устройством управления расходом РС); $p_{\text{кав}}$ — давление в кавитационном пузыре; w_1 — средняя скорость течения потока РС на входе в ШЗРУ, м/с.

Физический смысл числа кавитации k соответствует отношению перепада давления жидкости, приводящего к схлопыванию пузыря и изменению скорости течения потока РС, а следовательно, и к падению ее давления, при котором наблюдается образование и рост пузыря.

При выполнении (2) и условия равенства давления в кавитационном пузыре давлению насыщенного пара $p_{\text{н.п}}$ ($p_{\text{кав}} = p_{\text{н.п}}$) для расчета применяют критический параметр кавитации (соответствующий достижению значения $p_{\text{кав}}$ — минимального давления в потоке), определяемый по формуле

$$k_i = \frac{2(p_1 - p_{\text{н.п}})}{\rho w_1^2} = \frac{w_{\text{макс кав}}^2 - w_1^2}{w_1^2},$$

где $w_{\text{макс кав}}$ — максимальная скорость течения потока РС в условиях кавитации, м/с.

Критериями кавитации являются [5, 6] коэффициент кавитации k_c и коэффициент критического перепада давления k_m .

Коэффициент кавитации, используемый для расчета допускаемого перепада давления РС на ШЗРУ, при котором обеспечивается бескавитационный режим работы ШЗРУ, определяется выражением

$$k_c = \frac{\Delta p_c}{p_1 - p_{\text{н.п}}},$$

где Δp_c — перепад давления на ШЗРУ, соответствующий началу отклонения расходной характеристики от линейной зависимости.

Коэффициент k_m применяют для расчета критического перепада давления, соответствующего запариванию расхода РС в ШЗРУ [7–10], при кавитации (с однофазной РС на выходе) и вскипании РС на выходе из ШЗРУ с образованием устойчивой паровой фазы.

Коэффициент критического перепада

$$k_m = \frac{\Delta p_m}{p_1 - r_c p_{\text{н.п}}},$$

где Δp_m — критический перепад давления; r_c — полуэмпирический коэффициент критического отношения давлений, зависящий от физических свойств РС (воды).

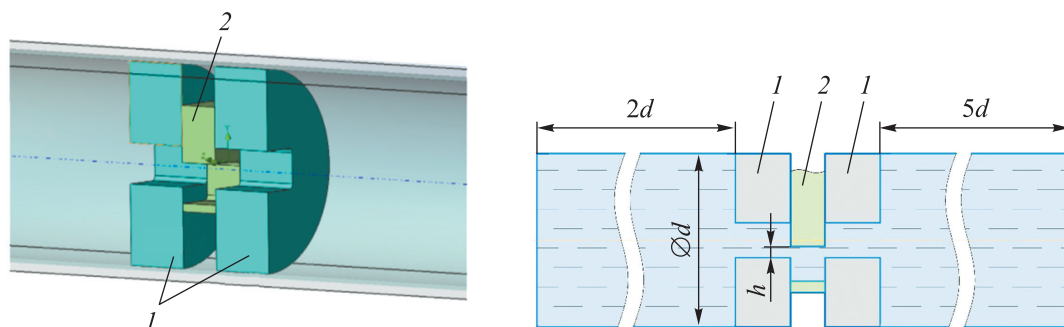


Рис. 2. Расчетная схема ШЗРУ с внутренним байпасом:
1 — шибер; 2 — заслонка

Расчетная схема ШЗРУ с внутренним байпасом [11] показана на рис. 2, где h — ход заслонки. Диаметры входного и выходного патрубков ШЗРУ одинаковые и составляют 125 мм.

Каналы в шибере и заслонке имеют одинаковые размеры: ширину $B = 50$ мм и высоту $H = 25$ мм. При регулировании заслонкой изменяются площади каналов, которые соединяют каналы в шибере с каналом в заслонке.

Расчеты проведены в программном комплексе SolidWorks 2022 с использованием модуля Flow Simulation. При расчете применена модель равновесной кавитации, основанная на подходе гомогенного равновесия. Эта модель позволяет описывать не только фазовые превращения, вызываемые падением давления в жидкости (гидродинамической кавитацией), но и ростом температуры в ней (кипением).

В основу этой модели положена система соотношений, описывающих равновесное термодинамическое состояние двухфазной гомогенной среды, состоящей из жидкости, пара и растворенного инертного газа, который принят идеальным. Использование модели позволяет определить равновесные параметры кавитирующего потока при условии, что необходимые термодинамические свойства текучей РС известны [12, 13].

Модель равновесной кавитации содержит следующие допущения и ограничения:

- процесс кавитации жидкости протекает равновесно;
- скорость течения и температура всех компонент газовой смеси (состоящей из пара и растворенного неконденсируемого газа) и жидкой фазы имеют одинаковые значения;
- в зоне фазового перехода значения температуры и давления РС должны находиться в диапазонах $280,15 \text{ K} < T < 583,15 \text{ K}$, $103 \text{ Па} < p < 107 \text{ Па}$;
- газовая фаза содержит растворенный (не сжиженный) газ, в качестве которого использован воздух; массовая доля растворенного газа составляет 10^{-4} ; допустимая объемная доля пара в двухфазной смеси не превышает 0,95;
- в модуле Flow Simulation нестационарные уравнения Навье — Стокса (1) решаются итерационным методом; в случае нестационарной задачи каждая итерация — это шаг по времени, который является одинаковым во всей расчетной области.

Результаты численного исследования кавитации в ШЗРУ с внутренним байпасом и их обсуждение. Результаты численного исследования течения РС через байпас, выполненного

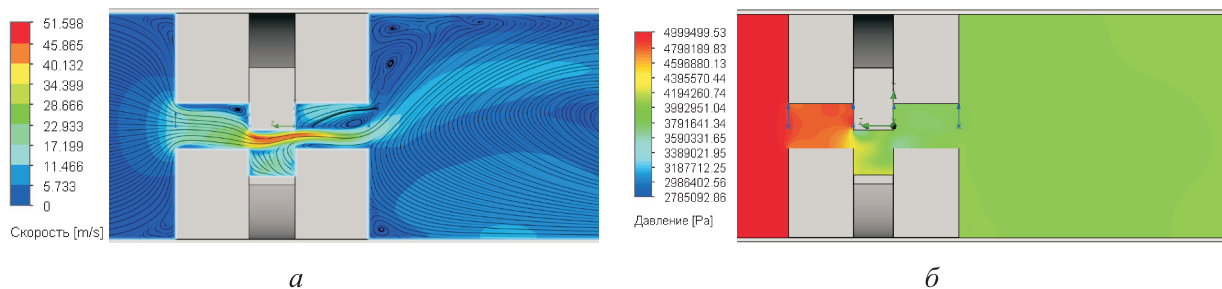


Рис. 3. Поля скорости течения РС, м/с, (а) и давления РС, Па, (б) в байпасе при ходе заслонки $h = 10$ мм

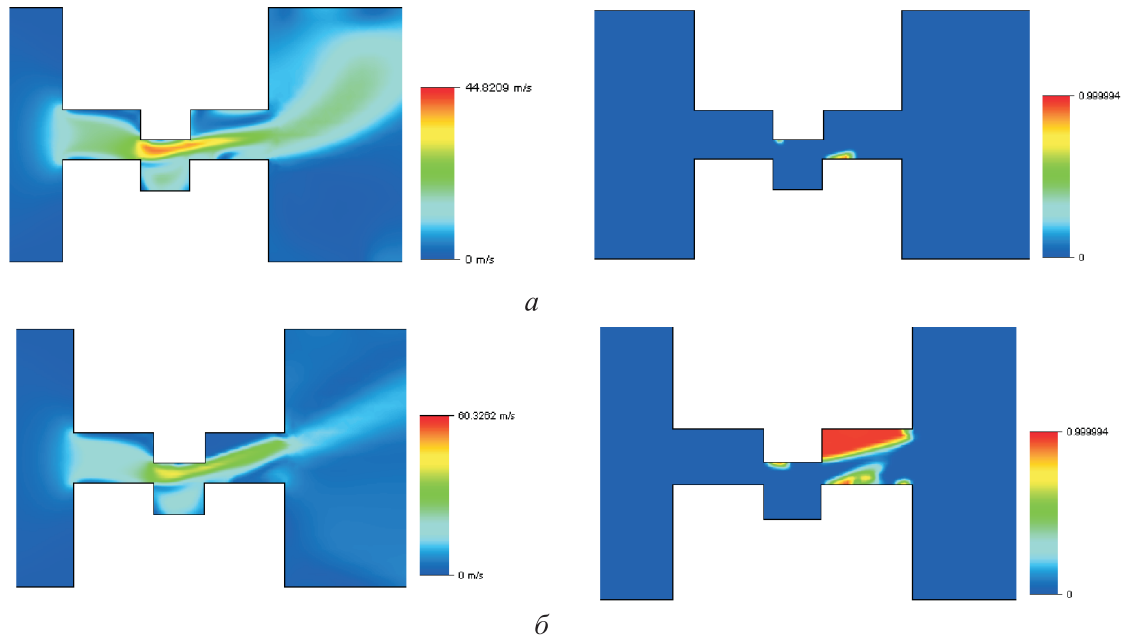


Рис. 4. Поля скорости течения РС (слева) и объемной концентрации пара (справа) при ходе заслонки $h = 10$ мм и перепаде давления РС $\Delta p = 0,85$ (а) и $1,00$ МПа (б)

в программном комплексе SolidWorks 2022 Flow Simulation, приведены на рис. 3–5.

Как видно из рис. 3, струя после байпаса не касается стенок канала, а кавитационные пузырьки, образовавшиеся в узком сечении, схлопываются в потоке, не разрушая его стенки.

Поля скорости течения РС и объемной концентрации пара при ходе заслонки $h = 10$ мм и перепаде давления РС $\Delta p = p_1 - p_2 = 0,85$ и $1,00$ МПа ($p_1 = 1,1$ МПа) приведены на рис. 4, а и б. Видно, что при повышении скорости течения РС возрастает объемная концентрация пара.

Зависимости расхода воды через ШЗРУ Q от квадратного корня из перепада давления $\sqrt{\Delta p}$ при ходе заслонки $h = 10$ и 5 мм приведены на рис. 5, а и б.

Анализ результатов исследований выявил переход зависимости расхода от квадратного корня из перепада давления от линейного вида к квадратичному.

Экспериментальное определение кавитационных характеристик ШЗРУ с внутренним байпасом выполнено на аттестованном стенде в ООО НПФ «МКТ-АСДМ» в соответствии с методикой, приведенной в работах [14–17]. При определении коэффициентов кавитации k_c и критического перепада давления k_m ШЗРУ с внутренним байпасом и исследовании влияния на них параметров РС каждое значение давления p_1 поддерживалось постоянным, а перепад

давления увеличивался ступенчато уменьшением p_2 до минимального значения.

При ходе заслонки $h = 5$ мм давление $p_1 = 1,1; 1,6; 2,1$ МПа (рис. 6, а), при ходе заслонки

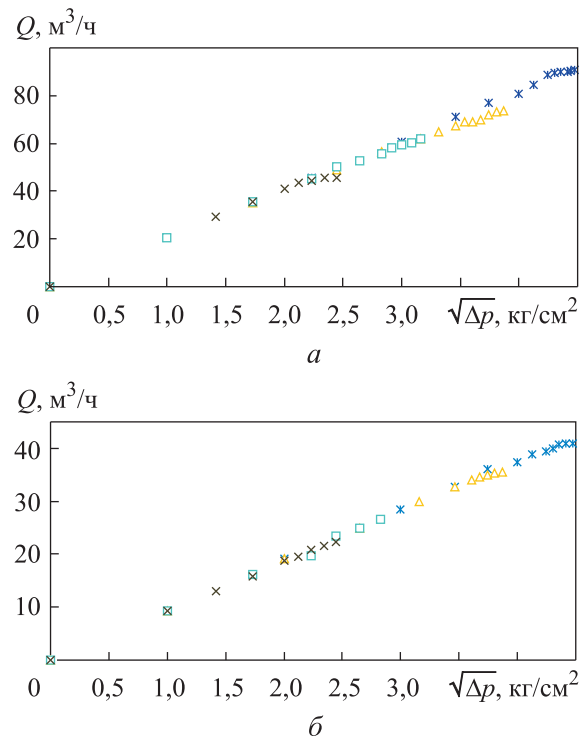


Рис. 5. Зависимости расхода воды через ШЗРУ Q от квадратного корня из перепада давления $\sqrt{\Delta p}$ при ходе заслонки $h = 10$ (а) и 5 мм (б) и давления РС $p_1 = 0,7$ (x), $1,1$ (□), $1,6$ (△) и $2,1$ МПа (*)

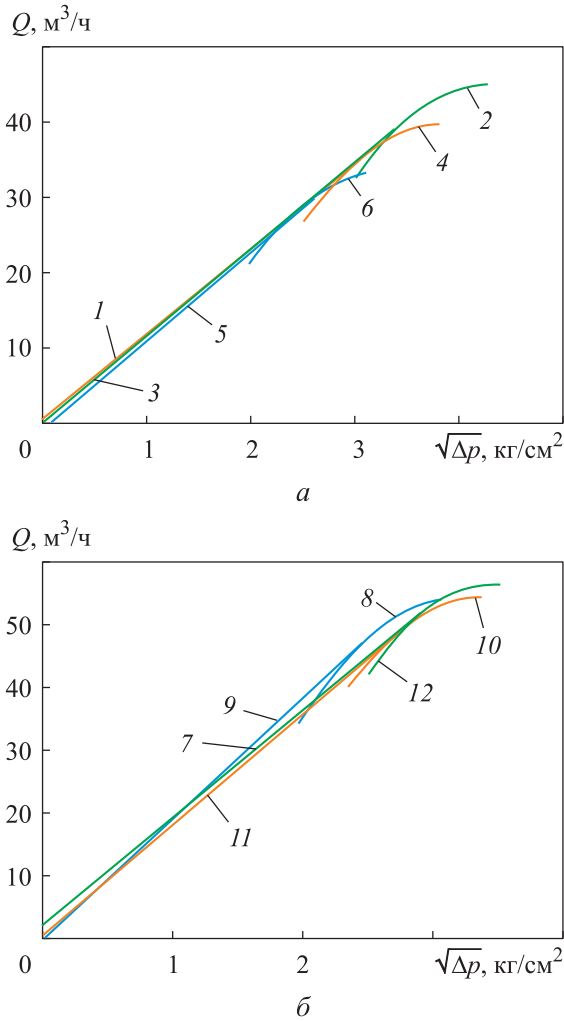


Рис. 6. Линейные (1, 3, 5, 7, 9, 11) и квадратичные (2, 4, 6, 8, 10, 12) зависимости расхода воды через ШЗРУ Q от корня квадратного из перепада давления $\sqrt{\Delta p}$, полученные по предложенной методике, при ходе заслонки $h = 5$ мм (а) и 10 мм (б) и различных значениях давления на входе в ШЗРУ:
 1, 2 — $p_1 = 2,1$ МПа; 3, 4 — $p_1 = 1,6$ МПа;
 5, 6 — $p_1 = 1,1$ МПа; 7, 8 — $p_1 = 1,4$ МПа;
 9, 10 — $p_1 = 1,3$ МПа

$h = 10$ мм давление $p_1 = 1,1; 1,3; 1,4$ МПа (рис. 6, б).

Обработку экспериментальных данных по предлагаемой методике проводили следующим образом. Строили зависимости $Q = f(\sqrt{\Delta p})$ для каждого положения регулирующего элемента: в первой зоне — линейную, во второй — квадратичную. Получали для них уравнения и составляли систему уравнений для каждого значения давления p_1 :

$$\begin{cases} Q = a\sqrt{\Delta p} + b; \\ Q = a\Delta p + b\sqrt{\Delta p} + c, \end{cases}$$

где a, b, c — коэффициенты.

Зависимость коэффициента кавитации от давления на входе в ШЗРУ при $h = 5$ мм

Давление p_1 , МПа	$\sqrt{\Delta p}$, МПа	Δp_{nk} , МПа	k_c
2,1	3,480	1,2110	0,577
1,6	3,089	0,9542	0,596
1,1	2,760	0,7617	0,692

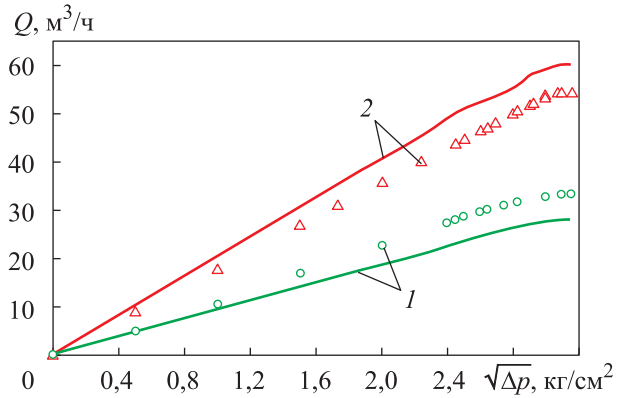


Рис. 7. Расчетные (кривые) и экспериментальные (точки) зависимости расхода воды через ШЗРУ Q от корня квадратного из перепада давления $\sqrt{\Delta p}$ при давлении РС $p_1 = 1,1$ МПа и ходе заслонки $h = 5$ мм (1) и 10 мм (2)

Решением системы уравнений является точка с координатами параметров Q и $\sqrt{\Delta p}$, которая определяет начало отклонения расходной характеристики $Q = f(\sqrt{\Delta p})$ от линейной зависимости. Пример графика показан на рис. 6.

Перепад давления начала отклонения расходной характеристики определяется выражением

$$\Delta p_{nk} = \sqrt{(\Delta p)^2}.$$

Зависимость коэффициента кавитации от давления на входе в ШЗРУ p_1 при ходе заслонки $h = 5$ мм приведена в таблице.

Результаты расчетных данных, полученных в программном комплексе Solidworks 2022 Flow Simulation, и экспериментальных данных при давлении $p_1 = 1,1$ МПа и ходе заслонки $h = 5$ и 10 мм приведены на рис. 7.

Отклонения расчетных кавитационных характеристик от экспериментальных не превышали $\pm 10\%$.

Выводы

1. Установлено, что среднее значение коэффициента кавитации по трем измерениям со-

ставляет 0,622. Максимальное отклонение от него (11,3 %) получено при давлении на входе в ШЗРУ $p_1 = 1,1$ МПа. Среднее значение коэффициента кавитации по двум измерениям (при $p_1 = 1,6$ и $2,1$ МПа) $k_c = 0,587$, максимальное отклонение от него не превышает 1,7 %. Результаты эксперимента показали, что при давлении до

испытываемой трубопроводной арматуры более 1,6 МПа значения коэффициента кавитации изменяются незначительно.

2. Показано, что расчетные значения кавитационных характеристик ШЗРУ с внутренним байпасом отличаются от экспериментальных не более чем на ± 10 %.

Литература

- [1] Арзуманов Э.С. *Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях*. Москва, Энергия, 1978. 303 с.
- [2] Рождественский В.В. *Кавитация*. Ленинград, Судостроение, 1977. 247 с.
- [3] Афанасьева О.В., Бакулина А.А., Коркунов С.Б. Перспективы развития российского арматуростроения в современных экономических условиях. *Газовая промышленность*, 2020, № 6, с. 70–73.
- [4] Чиняев И.Р., Шанаурин А.Л., Фоминых А.В. *Управление потоками жидкостей и газов. Ч. 1. Шибберные запорно-регулирующие устройства*. Курган, Изд-во КГУ, 2022. 248 с.
- [5] Заславский Г.А., Рязанов В.А., Сухов С.А. и др. *Запорно-регулирующее устройство*. Патент РФ 2586958. Заявл. 21.11.2014, опублик. 10.06.2016.
- [6] Власюк П.Э., Чернышев А.В., Чиняев И.Р. и др. Расчет пропускной способности шибберной задвижки для технологических линий нефтегазодобывающей промышленности. *Трубопроводная арматура и оборудование*, 2022, № 2, с. 37–39.
- [7] Малов Д.А., Чернышев А.В. Увеличение пропускной способности и диапазона регулирования проходного клапана. *Трубопроводная арматура и оборудование*, 2023, № 1, с. 25–27.
- [8] Игнатъева Т.Ю., Горобченко С.Л., Ковалев Д.А. Модель поведения регулирующего клапана. *Трубопроводная арматура и оборудование*, 2023, № 1, с. 12–15.
- [9] Fominykh A., Chinyayev I., Telminov A. et al. Development of a method for determining the specific pressures on the sealing fields of slide valves. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2503, no. 1, art. 050062, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0099962>
- [10] Чиняев И.Р., Фоминых А.В., Пошивалов Е.А. и др. Определение пропускной характеристики задвижки шибберной запорно-регулирующей. *Экспозиция нефть газ*, 2015, № 2, с. 38–40.
- [11] Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. Москва, Машиностроение, 1992. 671 с.
- [12] Wu H., Li J.Y., Gao Z.X. Flow Characteristics and stress analysis of a parallel gate valve. *Processes*, 2019, vol. 7, no. 11, art. 803, doi: <https://doi.org/10.3390/pr7110803>
- [13] Liu P., Liu Y., Huang Z. et al. Design optimization for subsea gate valve based on combined analyses of fluid characteristics and sensitivity. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, vol. 182, art. 106277, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106277>
- [14] ГОСТ 34437–2018. *Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик*. Москва, Стандартинформ, 2018. 33 с.
- [15] Фоминых А.В., Пошивалов Е.А., Ильиных Е.А. Определение гидравлических и кавитационных характеристик клеточного клапана. *Вестник Курганской ГСХА*, 2016, № 1, с. 71–75.
- [16] Котельников Л.В., Пошивалов Е.А., Фоминых А.В. и др. Гидравлические и кавитационные характеристики регулирующих клапанов в диапазоне давлений до 3,0 МПа. *Трубопроводная арматура и оборудование*, 2017, № 2, с. 54–55.
- [17] Чиняев И.Р., Фоминых А.В., Пошивалов Е.А. и др. Опыт использования ГОСТ Р 55508–2013 при определении гидравлических и кавитационных характеристик запорно-регулирующего клапана клеточного. *Территория нефтегаз*, 2016, № 7–8, с. 96–101.

References

- [1] Arzumanov E.S. *Kavitatsiya v mestnykh gidravlicheskih soprotivleniyakh* [Cavitation in local hydraulic resistances]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 303 p. (In Russ.).
- [2] Rozhdestvenskiy V.V. *Kavitatsiya* [Cavitation]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1977. 247 p. (In Russ.).
- [3] Afanasyeva O.V., Bakulina A.A., Korkunov S.B. Prospects for the development of the Russian valve industry in the current economic environment. *Gazovaya promyshlennost* [Gas Industry], 2020, no. 6, pp. 70–73. (In Russ.).
- [4] Chinyaev I.R., Shanaurin A.L., Fominykh A.V. *Upravlenie potokami zhidkostey i gazov*. Ch. 1. *Shibernye zaporno-reguliruyushchie ustroystva* [Fluid and gas flow control. P. 1. Shifter shut-off and control devices]. Kurgan, Izd-vo KGU Publ., 2022. 248 p. (In Russ.).
- [5] Zaslavskiy G.A., Ryazanov V.A., Sukhov S.A. et al. *Zaporno-reguliruyushchee ustroystvo* [Shutoff-control device]. Patent RU 2586958. Appl. 21.11.2014, publ. 10.06.2016. (In Russ.).
- [6] Vlasyuk P.E., Chernyshev A.V., Chinyaev I.R. et al. Calculation of gate valve capacity for oil and gas production lines. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*, 2022, no. 2, pp. 37–39. (In Russ.).
- [7] Malov D.A., Chernyshev A.V. Increase of flow capacity and control range of flow-through valve. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*, 2023, no. 1, pp. 25–27. (In Russ.).
- [8] Ignatyeva T.Yu., Gorobchenko S.L., Kovalev D.A. Model of control valve behaviour. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*, 2023, no. 1, pp. 12–15. (In Russ.).
- [9] Fominykh A., Chinyaev I., Telminov A. et al. Development of a method for determining the specific pressures on the sealing fields of slide valves. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2503, no. 1, art. 050062, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0099962>
- [10] Chinyaev I.R., Fominykh A.V., Poshivalov E.A. et al. The throughput ability of shutoff and control valves. *Ekspozitsiya neft gaz* [Exposition Oil & Gas], 2015, no. 2, pp. 38–40. (In Russ.).
- [11] Idelchik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 671 p. (In Russ.).
- [12] Wu H., Li J.Y., Gao Z.X. Flow Characteristics and stress analysis of a parallel gate valve. *Processes*, 2019, vol. 7, no. 11, art. 803, doi: <https://doi.org/10.3390/pr7110803>
- [13] Liu P., Liu Y., Huang Z. et al. Design optimization for subsea gate valve based on combined analyses of fluid characteristics and sensitivity. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2019, vol. 182, art. 106277, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106277>
- [14] GOST 34437–2018. *Armatura truboprovodnaya. Metodika eksperimentalnogo opredeleniya gidravlicheskih i kavitatsionnykh kharakteristik* [State standard GOST 34437–2018. Pipeline valves. Technique of the experimental determination of hydraulic and cavitation characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 33 p. (In Russ.).
- [15] Fominykh A.V., Poshivalov E.A., Ilinykh E.A. The determination of hydraulic and cavitating characteristics of the cell valve. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*, 2016, no. 1, pp. 71–75. (In Russ.).
- [16] Kotelnikov L.V., Poshivalov E.A., Fominykh A.V. et al. Calculation of gate valve capacity for oil and gas production lines. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*, 2017, no. 2, pp. 54–55. (In Russ.).
- [17] Chinyaev I.R., Fominykh A.V., Poshivalov E.A. et al. Experience of use of gost r 55508–2013 when determining hydraulic and cavitation characteristics of cellular stop-control valve. *Territoriya neftegaz*, 2016, no. 7–8, pp. 96–101. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 31.05.2023

Информация об авторе

МУФТАХОВ Вадим Зирякович — старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело». ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный университет» (628605, Нижегородск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 56, e-mail: muftahovvz@gmail.com).

Information about the author

MUFTAKHOV Vadim Ziryakovich — Senior Lecturer, Department of Oil and Gas Engineering. Nizhnevartovsk State University (628605, Nizhnevartovsk, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 56, e-mail: muftahovvz@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Муфтахов В.З. Расчетно-теоретическое и экспериментальное исследования кавитационных характеристик шиберных запорно-регулирующих устройств с внутренним байпасом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 84–92, doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-84-92

Please cite this article in English as:

Muftakhov V.Z. Computational, theoretical and experimental study of cavitation characteristics of the gate wellhead devices with the internal bypass. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 84–92, doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-84-92



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник В.В. Девяткова «Системы искусственного интеллекта»

Исследованы системы искусственного интеллекта как сообщества рассуждающих агентов. Каждый агент имеет возможность восприятия состояния среды, в которой он находится, и воздействия на нее с помощью реакций, вырабатываемых в результате осуществляемого им рассуждения в том или ином исчислении, на языке которого представляются знания агента. Создание системы искусственного интеллекта рассматривается как задача построения процедур такого рассуждения.

Для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по специальностям «Информационные системы и технологии» и «Автоматизированные системы обработки информации и управления» по направлениям подготовки «Информационные системы» и «Информатика и вычислительная техника».

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://bmstu.press>