

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОГО ДРОСЕЛИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ В ОСЕВОМ КЛАПАНЕ ДЛЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© А. Б. Капранова<sup>1</sup>✉, А. Е. Лебедев<sup>2</sup>, А. М. Мельцер<sup>3</sup>, С. В. Неклюдов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра «Теоретическая и прикладная механика», *kapranova\_anna@mail.ru*;  
<sup>2</sup> кафедра «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация;  
<sup>3</sup> Обособленное подразделение Московского центрального конструкторского бюро арматуростроения, Ярославль, Российская Федерация

**Ключевые слова:** гидравлическая кавитация; инженерный расчет; конструктивные параметры; осевой клапан; сепаратор.

**Аннотация:** Проведен анализ примера расчета сепаратора осевого клапана с внешним расположением запирающего органа, предназначенного для процесса дросселирования потоков жидкости. Использована инженерная методика расчета конструктивных параметров клапана в условиях снижения влияния гидродинамической кавитации в его проточной части. В основе методики лежат стохастические модели формирования пузырей на начальной стадии гидродинамической кавитации.

---

### Введение

Анализ современного состояния проблемы проектирования регулирующего оборудования для трубопроводных систем выявил ряд сложностей, относящихся к выбору соответствующих инженерных методик, возможности их модернизации при изменении режимов работы регулирующих устройств, адаптации к конкретным условиям эксплуатации. При этом применение готовых расчетных гидродинамических программных продуктов является недостаточным. Возникает необходимость формирования специальной киберфизической системы (КФС) для расчета параметров процесса дросселирования потоков жидких сред, который обеспечивает снижение давления в напорных трубопроводных системах за счет течения жидкости через суживающий канал. Разработка инженерной методики расчета параметров трубопроводной арматуры требует предварительного анализа не только непосредственно гидродинамической картины процесса дросселирования жидкости в проточной части клапана, но и отдельных элементов данной КФС, связанных с выбором множества параметров проектируемого технологического процесса. Определяющую роль при этом играет системно-структурный анализ [1] результатов теоретических и экспериментальных исследований [2 – 4]. Актуальность проектирования нового регулирующего оборудования для трубопроводных систем подтверждается необходимостью соответствия отечественного арматуростроения международным стандартам в условиях жесткой конкуренции. Проблема снижения интенсивности кавитационных явлений имеет несколько направленных решения, одно из которых – разветвление потоков рабочей среды [5]. В осе-

вых клапанах для этой цели используют сепараторы с дроссельными отверстиями. За счет конструктивных особенностей осевых клапанов создаются условия смещения образующихся кавитационных пузырей в зону оси сепаратора с дальнейшим их выводом из рабочего объема. Анализ современных математических моделей описания эволюции кавитационных пузырей [2] показал возможность применения не только двух классических подходов (детерминированного [6] и стохастического [9 – 14] для моделей нуклеации: гомогенной [7], с фактором гетерогенности [8], гетерогенной [9]), но и их комбинированных вариантов [10]. В настоящей работе предпочтение отдается стохастическому методу формирования математической модели процесса образования кавитационных пузырей [11] в указанных рабочих объемах [12], что связано с необходимостью оценки интегральных характеристик по ансамблю данной макросистемы полостей [13] и возможностью моделирования функций распределения пузырей без постулирования этого закона.

*Цель работы* – определение параметров осевого клапана в условиях эффективного дросселирования потоков жидкости в его проточной части на конкретном примере.

### Выбор параметров инженерного расчета сепаратора

Рассматривая работу регулирующего устройства с позиций процесса дросселирования потока жидкости, выделим основные этапы данной технологической операции. На входе в клапан подается рабочая жидкость при некотором значении скорости среды  $w$  в трубопровод с заданным максимальным объемным расходом  $Q_{1\max}$  и минимальным перепаде давления  $\Delta p_{\min}$  при температуре жидкости  $t_1$ . Считается, что клапан должен обеспечивать требуемую проходную способность  $K'_{vy}$ . Согласно специальному определению значение  $K'_{vy}$  соответствует объемному расходу воды при  $\Delta p_{\min} = 10^5$  Па. В процессе снижения давления в рабочем объеме клапана возникают области разрежения и образуются полости, заполняемые впоследствии после формирования сферических пузырей паром и растворенным в жидкости газом. Наблюдается гидродинамическая кавитация, эволюция которой имеет негативные последствия для физического состояния клапана и режима его работы. Наличие системы образующихся кавитационных пузырей требует учета данного эффекта при проектировании регулирующего устройства.

Выполним пример расчета некоторого множества проектируемых параметров сепаратора осевого клапана с внешним расположением запирающего органа [12]. Согласно предложенной авторами инженерной методике расчета проектируемых параметров [14] на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований [2 – 4], к входным данным следует отнести следующие численные значения режимных параметров:

$$X = \{X_{k_2} = \text{const}\} = \{Q_{1\max}, \delta_{1\Delta p_{\min}}, \delta_{2\Delta p_{\min}}, t_1, w\}, \quad k_2 = \overline{1, \rho_2}. \quad (1)$$

Выходным параметром является  $K'_{vy}$ , тогда обозначим

$$Y = \{Y_{k_5}\} = \{K'_{vy}\}, \quad k_5 = \overline{1, \rho_5}. \quad (2)$$

Набор дополнительных характеристик охватывает показатели физических и химических свойств рабочей жидкости

$$U = \{U_{k_3}\}, \quad k_3 = \overline{1, \rho_3}. \quad (3)$$

Наборы конструктивных параметров процесса дросселирования потока жидкости в клапане  $A = \{A_{k_1} = \text{const}\}$ ,  $k_1 = \overline{1, \rho_1}$  охватывают геометрические параметры его конструкции. Множество режимных параметров включает  $B = \{B_{k_4}\} = \{X_{k_2}, X_{k_6}\}$ ,  $k_6 = \overline{1, \rho_6}$ , где  $\{X_{k_6}\}$  – набор характеристических параметров системы кавитационных пузырей, например, минимальное значение радиуса; значения давлений пузыря в его центре – максимальное и характерное для усредненного значения радиуса. Образующий набор информационных переменных  $Z_i = \{X, Y, A, B\}$  предполагает условное разделение на четыре группы параметров: базисные  $z_m$  (рассчитываются из моделей с учетом характеристик свойств рабочей жидкости  $U$  из выражения (3)); проектные регламентируемые  $z_{pr}$  (конструктивные и технологические); проектные оптимизирующие  $z_{po}$  (заменяются рациональными значениями  $z_{pe}$  в пределах определяемых эффективных диапазонов изменения).

Пусть осевой регулирующий клапан с внешним расположением запирающего органа имеет рабочую жидкость – воду. Для потока воды зададим: расходные параметры ( $Q_{1\text{max}} = 0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  – максимально достижимый расход); предельные напряжения ( $\Delta p_{\text{min}} = 0,90 \text{ кПа}$  – минимальный перепад давления); характеристики физико-механических свойств ( $\rho_L = 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность;  $\gamma = 0,995 \text{ г·с/см}^3$  – объемный вес;  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура;  $\nu_1 = 0,81 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость;  $\sigma = 7,28 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$  – коэффициент поверхностного натяжения); кинематические показатели ( $w = 0,43 \text{ м/с}$  – скорость жидкости в трубопроводе) [15, 16].

Для кавитационных пузырей и внутренней их системы «газ – пар» считаются известными факторы [2 – 4]:  $r_{\text{min}} = 10^{-3} \text{ м}$  – минимальный радиус при  $p_{\text{max}} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ кПа}$  – максимальном давлении в его центре;  $p_s = 10^{-3} \text{ Па}$  – давление в этом центре при усредненном радиусе;  $\rho_g = 1,205 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_s = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$  – плотности воздуха и пара;  $k = 1,3$  – показатель адиабаты. К выходным параметрам расчета отнесем основные конструктивные параметры цилиндрического сепаратора с дроссельными отверстиями [12], обечайки в форме внешнего по отношению к сепаратору коаксиального цилиндра, элементов корпуса, а также регламентное значение проходной способности клапана  $K'_{vy} = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

### Пример инженерного расчета параметров сепаратора

Пусть при  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  требуется обеспечить следующие предельные значения для перепада давления  $\Delta p_{\text{min}}$ :  $\delta_{\Delta p_{\text{min}}}^{\text{min}} = 0,85 \text{ кПа}$  и  $\delta_{\Delta p_{\text{min}}}^{\text{max}} = 0,92 \text{ кПа}$ . С помощью эмпирической формулы из известных литературных источников [5]

$$\delta_{K_{vy1}}^{\text{min}} = \eta_1 Q_{1\text{max}} \left[ \frac{\gamma}{1,02 \cdot 10^{-5} \delta_{\Delta p_{\text{min}}}^{\text{max}}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

при заданных коэффициентах запаса  $\eta_1 = 1,1$  и  $\eta_2 = 1,2$  удастся рассчитать нижнее значение предела проходной способности осевого клапана  $\delta_{K_{vy1}}^{\text{min}} = 5,89 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Верхнее значение  $\delta_{K_{vy1}}^{\text{max}} = 6,24 \text{ м}^3/\text{ч}$  определяется аналогично выражению (4)

$$\delta_{K_{vy1}}^{\max} = \eta_1 Q_{1\max} \left[ \frac{\gamma}{1,02 \cdot 10^{-5} \delta_{\Delta p_{\min}}^{\min}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

тогда справедливо условие:  $5,89 \leq 6,00 \leq 6,24$ . Для расчета диаметра трубопровода  $d = 2,03 \cdot 10^{-2}$  м использована формула [5]

$$d = 1,88 \cdot 10^{-2} (Q_{1\max} / w)^{1/2}, \quad (6)$$

следовательно, начальное приближение для диаметра условного прохода клапана равно  $D_y^{(0)} = [2,03 \cdot 10^{-2}] = 0,03$  м. С помощью последнего показателя согласно

выражениям:  $\delta_2^{(0)} = 0,1 D_y^{(0)}$ ;  $h^{(0)} = \delta_2^{(0)} / 2$ ;  $D_{\text{out}}^{(0)} = 1,1 D_y^{(0)}$ ;  $L^{(0)} = 2,2 D_{\text{out}}^{(0)}$ ;

$d_0^{(0)} = 0,14$ ;  $S_{\text{ф1}}^{(0)} = d_0^{(0)}$ ;  $l_0^{(0)} = [3(a_0^{(0)} + S_{\text{ф1}}^{(0)}) - d_0^{(0)}] / 3$ ;  $u_2^{(0)} = \pi D_{\text{out}}^{(0)} / (2d_0^{(0)})$ ;

$u_1^{(0)} = (L^{(0)} - l_0^{(0)}) / (l_0^{(0)} + d_0^{(0)})$ ;  $D_c^{(0)} = D_{\text{out}}^{(0)} + h^{(0)}$ ;  $D_{\text{ch2}}^{(0)} = 3D_{\text{out}}^{(0)} / 2$ ;  $D_{\text{cas2}}^{(0)} = 2D_{\text{out}}^{(0)}$

выполняется расчет значений для множества искомым параметров в нулевом приближении. К данным параметрам относятся: толщины корпуса и сепаратора  $\delta_2^{(0)} = 3,0 \cdot 10^{-3}$  м и  $h^{(0)} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м; внутренний  $D_{\text{out}}^{(0)} = 3,3 \cdot 10^{-2}$  м и внешний

$D_c^{(0)} = 3,15 \cdot 10^{-2}$  м диаметры сепаратора; длина сепаратора  $L^{(0)} = 2,2 D_{\text{out}}^{(0)} =$

$= 7,26 \cdot 10^{-2}$  м; диаметр дроссельных отверстий  $d_0^{(0)} = 0,14 D_{\text{out}}^{(0)} = 4,62 \cdot 10^{-3}$  м; рас-

стояния между ними в одном ряду на поверхности сепаратора  $S_{\text{ф1}}^{(0)} = 4,62 \cdot 10^{-3}$  м;

расстояния между рядами  $l_0^{(0)} = 5,68 \cdot 10^{-3}$  м; общее число рядов  $u_2^{(0)} = [6,49] = 7$ ;

число отверстий в одном ряду  $u_1^{(0)} = [11,23] = 12$ ; внешний диаметр внутреннего

корпуса клапана  $D_{\text{ch2}}^{(0)} = 4,95 \cdot 10^{-2}$  м; внешний диаметр для цилиндрических час-

тей внешнего корпуса осевого клапана  $D_{\text{cas}}^{(0)} = 6,6 \cdot 10^{-2}$  м; угол скоса обечайки

(внешнего подвижного цилиндра)  $\alpha^{(0)} = 45^\circ$ . Расчет критического значения числа

Рейнольдса  $Re_{\text{кр}} = 5209,58$ , входящего в условие бескавитационного режима работы клапана  $Re_y \leq Re_{\text{кр}}$ , выполняется по формуле, полученной с помощью сто-

хастической модели образования кавитационных пузырей на начальном этапе гидродинамической кавитации [2, 3, 11]:

$$Re_{\text{кр}} = 32 \rho_L k_{\zeta 1} \frac{u_1^{(0)} h_0^{(0)} (D_y^{(0)})^2 [2(L^{(0)} - l_0^{(0)}) - \beta_0^{(0)}]}{\left\{ \beta_0^{(0)} (d_0^{(0)})^3 [4a_1 r_{\min}^4 + \rho_L k_{\zeta 1} (B_1 + \beta_2^{(0)})] \right\}}, \quad (7)$$

где обозначенные коэффициенты  $k_{\zeta 1}, a_1, B_1, \beta_0^{(0)}, \beta_2^{(0)}$  зависят от конструктивных параметров среды и ее физико-механических свойств. Заметим, что формула (7) получена из условия экстремума для энергетического параметра  $E_{02}(z)$ , описанного в работе [3] в зависимости от степени открытия осевого клапана  $z$  в момент его полного открытия ( $z = 1$ ). Тогда вычисление первого приближения для диаметра условного прохода  $D_y^{(1)} = 4,22 \cdot 10^{-2}$  м и пределов его изменения

$\delta_{D_y}^{\min} = 4,19 \cdot 10^{-2}$ ,  $\delta_{D_y}^{\max} = 4,28 \cdot 10^{-2}$  можно провести соответственно по опытным формулам из [5]:

$$D_y^{(1)} = 3,53 Q_{1\max} / (v_1 \text{Re}_{\text{кр}}); \quad (8)$$

$$\delta_{D_y}^{\max} = \left[ 4 \delta_{K_{vy1}}^{\max} \zeta_{12}^{(0)}(z_0) / (5,04 \cdot 10^4 \pi) \right]^{1/2}, \quad (9)$$

где значения  $Q_{1\max}$ ,  $v_1$  – входные параметры расчета;  $\zeta_{12}^{(0)}(z_0)$  – значение коэффициента гидравлического сопротивления при степени открытия клапана  $z_0$ , равной значению функции  $z_0 = z(u_2^{(0)})$ . Здесь  $u_2^{(0)}$  – нулевое приближение для значения конструктивного параметра из набора  $A = \{A_{k_1} = \text{const}\}$ ,  $k_1 = \overline{1, \rho_1}$ , числа рядов дроссельных отверстий на поверхности сепаратора. Заметим, что расчет значения  $\delta_{D_y}^{\min}$  выполняется аналогично формуле (8).

Вследствие невыполнения условия  $\text{Re}_{\text{кр}} \leq 2 \cdot 10^3$  из [5] вычисление поправочных коэффициентов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  на вязкость рабочей среды для пределов изменения проходной способности клапана  $K_{v\max}^{(2)} \in [\delta_{K_{vy2}}^{\min}; \delta_{K_{vy2}}^{\max}]$  не требуется и можно перейти к оценке значений первых приближений для пределов изменения следующих конструктивных параметров сепаратора  $d_{0j}^{(1)}, u_{2j}^{(1)}, L_j^{(1)}, l_{0j}^{(1)}$ , где значения  $j = 1, 2$  соответствуют  $\delta_{D_y}^{\min}, \delta_{D_y}^{\max}$  – пределам изменения значения  $D_y^{(1)}$  (м) согласно (8). Усредненные значения  $\bar{d}_0^{(1)}, \bar{u}_2^{(1)}, \bar{L}^{(1)}, \bar{l}_0^{(1)}$  искомых параметров определяются согласно [14]:  $\bar{u}_2^{(1)} = [7,54] = 7$ ;  $\bar{d}_0^{(1)} = 5,05 \cdot 10^{-3}$  м;  $\bar{l}_0^{(1)} = 5,84 \cdot 10^{-3}$  м;  $\bar{L}^{(1)} = 8,21 \cdot 10^{-2}$  м. Поиск  $\bar{D}_{\text{out}}^{(1)} = 4,24 \cdot 10^{-2}$  м;  $S_{\phi}^{(1)} = 6,03 \cdot 10^{-3}$  м – значений первых приближений для внутреннего диаметра сепаратора  $\bar{D}_{\text{out}}^{(1)}$  и параметра  $S_{\phi}^{(1)}$  можно провести с помощью системы уравнений. Одно из них отражает условие линейного профилирования пропускной характеристики клапана от степени его открытия, а второе – условие экстремума для коэффициента гидравлического сопротивления по параметру  $u_2$  согласно [5].

Значение второго приближения для внутреннего диаметра сепаратора  $D_{\text{out}}^{(2)} = 4,19 \cdot 10^{-2}$  м и первого приближения угла скоса для цилиндрической части обечайки  $\alpha^{(1)} = 44,84^\circ$  получены из двух следствий для условия экстремума энергетического параметра по степени открытия клапана [4], например, в виде

$$\alpha^{(1)} = \beta_1^{(1)} \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{\beta_0^{(1)}} (\bar{L}^{(1)} - l_0^{(2)}) \right] + \frac{\theta_1 - \theta_4}{\theta_2}, \quad (10)$$

где  $\theta_1, \theta_2, \theta_4$  – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров среды и ее физико-механических свойств. Здесь значения констант  $\beta_0^{(1)}, \beta_1^{(1)}$  в соответст-

вии с выражениями (7), (8) для критического значения числа Рейнольдса  $Re_{кр}$  и первого приближения для диаметра условного прохода  $D_y^{(1)}$  определяются выражениями:

$$\beta_0^{(1)} = \bar{l}_0^{(1)} - \bar{d}_0^{(1)}; \quad (11)$$

$$\beta_1^{(1)} = \frac{64}{Re_{кр}} \frac{\bar{u}_1^{(0)} h_0^{(0)} (\bar{D}_y^{(1)})^2}{(\bar{d}_0^{(1)})^3}. \quad (12)$$

Согласно [11], выполняется расчет для первых приближений следующих параметров:  $\delta_2^{(1)} = 4,22 \cdot 10^{-3}$  м;  $h^{(1)} = 2,11 \cdot 10^{-3}$  м;  $D_c^{(1)} = 4,13 \cdot 10^{-2}$  м;  $D_{ch2}^{(1)} = 6,25 \cdot 10^{-2}$  м;  $D_{cas2}^{(1)} = 8,69 \cdot 10^{-2}$  м. Вычислив значение коэффициента гидравлического сопротивления, согласно предложенным в [4] формулам,  $\zeta_y [z(u_2^{(1)})] = 166,99$ , можно перейти к определению критического его значения  $\zeta_y^*$  из условия минимальности  $r_{sb}^{\min}$  для среднего по ансамблю значения радиуса кавитационного пузыря, согласно [4, 14], тогда  $\zeta_y^* = 1,19 \cdot 10^{-1}$ . Проверка условия  $\zeta_y^* \leq \zeta_y$ , отражающего возможное проявление кавитационного эффекта в проточной части клапана, позволяет по графику зависимости числа кавитации  $k_c(\zeta_y^*)$  [5] от значения  $\zeta_y^*$  оценить критический параметр  $k_{c\max} = 0,6$ . Следовательно, при заданном абсолютном давлении жидкости до регулирующего клапана при ее максимальном расходе получены значения критического (максимально допустимого) перепада давления  $\Delta p_{\max}^* = 0,899$  кПа =  $9,179 \cdot 10^{-3}$  кгс/см<sup>2</sup> из классической формулы [5]

$$\Delta p_{\max}^* = k_{c\max} (p_1 - p_{н1}), \quad (13)$$

где  $p_1, p_{н1}$  – абсолютные давления соответственно для жидкости (до клапана при максимальном расходе) и насыщенного пара при заданной температуре.

Пользуясь формулой из [5]

$$K_{v\max} = \eta_{12} Q_{1\max} (\gamma / \Delta p_{\max}^*)^{1/2} \quad (14)$$

с коэффициентом запаса  $\eta_{12}$ , можно установить  $K_{v\max} = 5,21$  м<sup>3</sup>/ч.

Итак, вследствие выполнения условия  $K_{v\max} \leq K'_{vy}$  следующие приближения параметров осевого клапана [16, 17] являются искомыми: для сепаратора:  $\bar{d}_0^{(1)} = 5,05 \cdot 10^{-3}$  м;  $S_{ф1}^{(1)} = 6,03 \cdot 10^{-3}$  м;  $h^{(1)} = 2,11 \cdot 10^{-3}$  м;  $\bar{u}_1^{(1)} = 12$ ;  $\bar{u}_2^{(1)} = 7$ ;  $\bar{l}_0^{(1)} = 5,84 \cdot 10^{-3}$  м;  $\bar{D}_{out}^{(2)} = 4,19 \cdot 10^{-2}$  м;  $D_c^{(1)} = 4,55 \cdot 10^{-2}$  м;  $\bar{L}^{(1)} = 8,21 \cdot 10^{-2}$  м; для обечайки:  $\alpha^{(1)} = 44,84^\circ$ ; для корпуса:  $D_{ch2}^{(1)} = 6,25 \cdot 10^{-2}$  м;  $\bar{D}_{cas2}^{(1)} = 8,69 \cdot 10^{-2}$  м;  $\delta_2^{(1)} = 4,22 \cdot 10^{-3}$  м.

## Заключение

Таким образом, при построении инженерной методики расчета основных конструктивно-режимных параметров применялись результаты стохастических моделей образования кавитационных пузырей в проточной части осевого клапана, предложенные авторами [2 – 4, 11]. В частности, использованы выражения, полученные с учетом явного вида дифференциальных функций распределения числа пузырей по их удельным размерам из [2, 11] и дифференциальных функций распределения числа пузырей по степени открытия клапана из [3, 4]. Основным отличительным особенностям предложенной методики расчета от известных ранее соответствует применение следующих положений стохастических моделей авторов: а) установленной связи между критическим значением числа Рейнольдса и искомыми параметрами клапана при анализе его бескавитационного режима работы; б) выражений для энергетических параметров моделей, среднего значения диаметра по ансамблю макросистемы кавитационных пузырей в области сепаратора, коэффициента гидравлического сопротивления в переходной области течения жидкости. Кроме того, возможно отыскание не только рациональных диапазонов изменения проектируемых параметров киберфизической системы, но и оптимальных их значений при дополнительном исследовании способов построения целевой функции решения задачи оптимизации.

### *Список литературы*

1. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение : монография / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов ; отв. ред. Н. М. Жаворонков. – Москва : Юрайт, 2023. – 440 с.
2. Determination of the average parameters of cavitation bubbles in the flowing part of the control valves / A. Kapranova, A. Lebedev, A. Melzer, S. Neklyudov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, No. 3. – P. 25–31.
3. Investigation of the energy of the stochastic motion of cavitation bubbles in the separator of the axial valve, depending on the degree of its opening / A. Kapranova, A. Lebedev, A. Melzer, S. Neklyudov // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, No. 8. – P. 160–166.
4. Qualitative evaluation of the coefficient of hydraulic resistance in the area of the divider of the fluid flow of the axial valve / A. Kapranova, S. Neklyudov, A. Lebedev, A. Melzer // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9, No. 8. – P. 153–159.
5. Арзуманов, Э. С. Расчет и выбор регулирующих органов автоматических систем / Э. С. Арзуманов. – Москва : Энергия, 1971. – 112 с.
6. Рождественский, В. В. Кавитация : учебное пособие / В. В. Рождественский. – Ленинград : Судостроение, 1977. – 248 с.
7. Volmer, V. Keimbildung in übersättigten Gebilden / V. Volmer, A. Weber // Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 1926.– Vol. 119. – S. 277–301. doi: 10.1515/zpch-1926-11927
8. Lienhard, J. H. Homogeneous Nucleation and the Spinodal Line / J. H. Lienhard, A. Karimi // Journal of Heat Transfer. – 1981. – Vol. 103, No. 1. – P. 61–64. doi: 10.1115/1.3244431
9. Kedrinskii, V. K. Hydrodynamics of Explosion: Experiments and Models. – Berlin : Springer, 2005. – 362 p.
10. Petrov, N. Effect of a bubble nucleation model on cavitating flow structure in rarefaction wave / N. Petrov, A. Schmidt // Shock Waves. – 2017. – Vol. 27, No. 4. – P. 635–639. doi: 10.1007/s00193-016-0699-z

11. Kapranova, A. B. Stochastic simulation of cavitation bubbles formation in the axial valve separator influenced by degree of opening / A. B. Kapranova, A. Miadonye // *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences*. – 2019. – Vol. 2, No. 2. – P. 70–75. doi: 10.30881/jogps.00026
12. Патент на полезную модель № 175446 Российская Федерация, МПК F16K 1/12, F16K 47/14, F16K 3/24. Прямоточный регулирующий клапан : № 2016152400 : заявл. 23.12.2015 : опубл. 05.12.2017 / Лебедев А. Е., Капранова А. Б., Мельцер А. М., Солопов С. А., Воронин Д. В., Неклюдов В. С., Серов Е. М. ; заявитель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – Бюл. № 34. – 5 с.
13. The ensemble-averaged characteristics of the bubble system during cavitation in the separator / A. B. Kapranova, A. E. Lebedev, S. V. Neklyudov, A. M. Melzer // *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*. – 2019. – Vol. 140, No. 2. – P. 06005. doi: 10.1051/e3sconf/201914006005
14. Engineering Method for Calculating of an Axial Valve Separator With an External Location of the Locking Part / A. B. Kapranova, A. E. Lebedev, S. V. Neklyudov, A. M. Melzer // *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems*. – 2020. – Vol. 8, article 32. – P. 1–17 (March 2020). doi: 10.3389/fenrg.2020.00032
15. The Applying of the Formalism of Cyber-Physical Systems in the Description of Hydrodynamic Cavitation in a Direct-Flow Valve/ A. B. Kapranova, A. E. Lebedev, A. M. Melzer, S. V. Neklyudov, A. S. Brykalov // In book: *Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control. Studies in Systems, Decision and Control* / eds. A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov. – Springer, Cham, 2021. – Vol. 338. – P. 295–308. doi: 10.1007/978-3-030-66077-2\_24
16. К расчету параметров сепаратора осевого клапана трубопроводных систем / А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев, А. М. Мельцер, С. В. Неклюдов // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-32 : сб. трудов 32-й Междунар. науч. конф. в 12 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – Т. 9. – С. 57–60.*
17. About Formation of Elements of a Cyber-Physical System for Efficient Throttling of Fluid in an Axial Valve / A. B. Kapranova, A. E. Lebedev A. M. Melzer, S. V. Neklyudov // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2020. – Vol. 259. – P. 109–119. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4\_9

---

### Determining the Parameters of Effective Fluid Throttle in an Axial Valve for a Cyberphysical System

© A. B. Kapranova<sup>1</sup>✉, A. E. Lebedev<sup>2</sup>, A. M. Meltzer<sup>3</sup>, S. V. Neklyudov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Department of Theoretical and Applied Mechanics, kapranova\_anna@mail.ru;*

<sup>2</sup>*Department of Information Systems and Technologies, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation;*

<sup>3</sup>*Separate Division of Moscow Central Design Bureau of Valve Engineering, Yaroslavl, Russian Federation*

**Keywords:** hydraulic cavitation; engineering calculation; design parameters; axial valve; separator.

**Abstract:** This paper analyzes a design example for an axial valve separator with an externally located shutoff element, designed for throttling fluid flows. An engineering methodology for calculating the valve's design parameters is used to reduce the impact of hydrodynamic cavitation in its flow path. The methodology is based on stochastic models of bubble formation during the initial stage of hydrodynamic cavitation.

### References

1. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu.; Zhavoronkov N.M. (Ed.) *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii: izmel'cheniye i smesheniye: monografiya* [Systems analysis of chemical engineering processes: grinding and mixing: monograph], Moscow: Yurayt, 2023, 440 p. (In Russ.)
2. Kapranova A., Lebedev A., Melzer A., Neklyudov S. Determination of the average parameters of cavitation bubbles in the flowing part of the control valves, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 25-31.
3. Kapranova A., Lebedev A., Melzer A., Neklyudov S. Investigation of the energy of the stochastic motion of cavitation bubbles in the separator of the axial valve, depending on the degree of its opening, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, no. 8, pp. 160-166.
4. Kapranova A., Neklyudov S., Lebedev A., Melzer A. Qualitative evaluation of the coefficient of hydraulic resistance in the area of the divider of the fluid flow of the axial valve, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, no. 8, pp. 153-159.
5. Arzumanov E.S. *Raschet i vybor reguliruyushchikh organov avtomaticheskikh sistem* [Calculation and Selection of Control Units of Automatic Systems], Moscow: Energiya, 1971, 112 p. (In Russ.)
6. Rozhdestvenskiy V.V. *Kavitatsiya: uchebnoye posobiye* [Cavitation: a textbook], Leningrad: Sudostroyeniye, 1977, 248 p. (In Russ.)
7. Volmer V., Weber A. Keimbildung in übersättigten Gebilden, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1926, vol. 119, pp. 277-301. doi: 10.1515/zpch-1926-11927
8. Lienhard J.H., Karimi A. Homogeneous Nucleation and the Spinodal Line, *Journal of Heat Transfer*, 1981, vol. 103, no. 1, P. 61–64. doi: 10.1115/1.3244431
9. Kedrinskii V.K. *Hydrodynamics of Explosion: Experiments and Models*, Berlin: Springer, 2005, 362 p.
10. Petrov N., Schmidt A. Effect of a bubble nucleation model on cavitating flow structure in rarefaction wave, *Shock Waves*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 635-639. doi: 10.1007/s00193-016-0699-z
11. Kapranova A.B., Miadonye A. Stochastic simulation of cavitation bubbles formation in the axial valve separator influenced by degree of opening, *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 70-75. doi: 10.30881/jogps.00026
12. Lebedev A.Ye., Kapranova A.B., Mel'tser A.M., Solopov S.A., Voronin D.V., Neklyudov V.S., Serov Ye.M. *Pryamotokhnny reguliruyushchiy klapán* [Straight-through control valve], Russian Federation, 2017, Pat. 175446 (In Russ.)
13. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Neklyudov S.V., Melzer A.M. The ensemble-averaged characteristics of the bubble system during cavitation in the separator, *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*, 2019, vol. 140, no. 2, pp. 06005. doi: 10.1051/e3sconf/201914006005
14. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Neklyudov S.V., Melzer A.M. Engineering Method for Calculating of an Axial Valve Separator With an External Location of the Locking Part, *Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems*, 2020, vol. 8, article 32, pp. 1-17 (March 2020). doi: 10.3389/fenrg.2020.00032

15. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Melzer A.M., Neklyudov S.V., Brykalov A.S. The Applying of the Formalism of Cyber-Physical Systems in the Description of Hydrodynamic Cavitation in a Direct-Flow Valve, In book: *Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control. Studies in Systems, Decision and Control* [A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov], Springer, Cham, 2021, vol. 338, pp. 295-308. doi: 10.1007/978-3-030-66077-2\_24

16. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Melzer A.M., Neklyudov S.V. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT-32: sb. trudov 32 Mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical methods in engineering and technology - MMTT-32: collected works of the 32nd Int. scientific conf], in 2 vols., St.-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhn. un-ta, 2019, vol. 9, pp. 57-60. (In Russ.)

17. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Melzer A.M., Neklyudov S.V. About Formation of Elements of a Cyber-Physical System for Efficient Throttling of Fluid in an Axial Valve, *Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 259, pp. 109-119. doi: 10.1007/978-3-030-32579-4\_9

---

### **Bestimmung der Parameter der effektiven Fluidrossung in einer Axialklappe für ein kyberphysikalisches System**

**Zusammenfassung:** Dieser Artikel analysiert ein Konstruktionsbeispiel für einen Axialventilabscheider mit extern positioniertem Absperrerelement zur Drosselung von Fluidströmen. Eine ingenieurtechnische Methodik zur Berechnung der Ventilparameter ist eingesetzt, um den Einfluss hydrodynamischer Kavitation im Strömungsweg zu minimieren. Die Methodik basiert auf stochastischen Modellen der Blasenbildung in den Anfangsstadien der hydrodynamischen Kavitation.

---

### **Détermination des paramètres d'étranglement effectif du fluide dans la vanne axiale pour le système cyberphysique**

**Résumé:** Est faite l'analyse d'un exemple de calcul d'un séparateur axial avec un dispositif de verrouillage externe destiné au processus d'étranglement des flux de liquide. Est utilisée la méthode d'ingénierie pour calculer les paramètres de la conception de la vanne dans des conditions de la réduction de l'influence de la cavitation hydrodynamique dans sa partie d'écoulement. La technique est basée sur des modèles stochastiques de formation de bulles au stade initial de la cavitation hydrodynamique.

---

**Авторы:** *Капранова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»; *Лебедев Антон Евгеньевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», *Мельцер Александр Михайлович* – директор по науке и инновационным проектам, Обособленное подразделение Московского центрального конструкторского бюро арматуростроения, Ярославль, Российская Федерация; *Неклюдов Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке и инновационным проектам, Обособленное подразделение Московского центрального конструкторского бюро арматуростроения, Ярославль, Российская Федерация.