

Стохастическая модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части регулирующего клапана

А.Б. Капранова¹, А.Е. Лебедев¹, А.М. Мельцер², С.В. Неклюдов²

¹ ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Российская Федерация

² ЗАО НПО «Регулятор», г. Ярославль, Российская Федерация

E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Регулирующие клапаны относятся к разряду энергетической арматуры и традиционно активно эксплуатируются в энергетической промышленной отрасли. Необходимость обеспечения надежных и безопасных условий работы регулирующего оборудования в различных трубопроводных системах приводит проектировщиков данных устройств к проблеме борьбы с последствиями эффекта кавитации с помощью зачастую уникальных конструктивных решений, в том числе основанных на принципе разделения потоков транспортируемой среды. Математическое описание начальной стадии образования кавитационных пузырей при работе регулирующих органов является одним из этапов формирования инженерной методики для расчета проектируемого оборудования специального назначения.

Материалы и методы: Применяется стохастический метод математического моделирования, основанный на равновесном представлении состояний энергетически закрытой макросистемы.

Результаты: Рассматривается вопрос стохастического моделирования процесса образования пузырей при гидродинамической кавитации в проточной части регулирующего клапана с учетом физико-механических характеристик жидкостной среды и конструктивно-режимных параметров устройства. Предложенный метод формирования стохастической энергии одиночного пузыря в проточной части регулирующего клапана при начальной стадии эволюции гидродинамической кавитации позволяет получить равновесную дифференциальную функцию распределения числа кавитационных пузырей по их размерам. Приведены примеры расчета данных функций в зависимости от соотношения содержания газа и пара в кавитационной полости, а также конструктивно-режимных параметров регулирующего устройства, в частности площади проходного сечения при заданной проходной способности клапана. Теоретически установлены пределы изменения размеров полостей, образующихся вследствие гидродинамической кавитации, а также зависимость между числом кавитационных пузырей и основными параметрами процесса их образования в проточной части регулирующего клапана, к которым, в том числе, относятся показатели его пропускной способности и гидродинамического сопротивления жидкостной среды.

Выводы: Результаты предложенной стохастической модели могут быть использованы для оценки усредненных значений размеров одиночного пузыря, общего объема кавитационных полостей, времени образования полости указанного объема, необходимых для формирования инженерных методик расчета проектируемых регулирующих органов.

Ключевые слова: регулирующий клапан, гидродинамическая кавитация, стохастическая модель, кавитационные пузыри, стохастическая энергия, функция распределения.

Stochastic model of cavitation bubble formation in control valve flow path

A.B. Kapranova¹, A.E. Lebedev¹, A.M. Meltser², S.V. Neklyudov²

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

² ZAO NPO «Regulator», Yaroslavl, Russian Federation

E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Abstract

Background: Control valves belong to the category of power armature and are traditionally operated in the power industry. In order to ensure reliable and safe operation of regulating equipment in various piping systems, designers of these devices often have to solve the problem of combating the impact of cavitation effect by means of unique design solutions, including those based on the principle of transported medium flow separation. Mathematical description of the initial stages of cavitation bubble formation during regulatory devices operation is one of the stages of developing engineering techniques for calculating of the designed equipment.

Materials and methods: A stochastic method of mathematical modeling based on equilibrium representation of an energetically closed macrosystem is applied.

Results: In this paper we consider the question of stochastic modeling of bubble formation during hydrodynamic cavitation in the flow path of control valve taking into account the physico-mechanical characteristics of liquid environment and designed operating parameters of the device. The proposed method of formation of stochastic energy of a single bubble in the control valve flow path at the initial stage of hydrodynamic cavitation evolution allows obtaining the equilibrium differential distribution function of the cavitation bubbles number according to their sizes. The paper contains examples of calculating these functions depending on the content ratio of gas and vapor in the cavitation bubble, as well as designed operating parameters of the regulating device, in particular the flow area at a given value of

the valve flow capacity. We have determined the limits of changing the sizes of cavities formed as a result of hydraulic cavitation and the dependence between the number of cavitation bubbles and the main parameters of their formation in the flow path of the control valve including, among others, the indicators of its flow capacity and hydro-dynamic resistance of the liquid medium.

Conclusions: In the future, the results of the proposed stochastic model can be used to estimate the average size of a single bubble, the total volume of the cavitation bubbles, formation time of the cavitation cavity of a specified volume required to develop engineering methods of regulatory element calculation.

Key words: control valve, hydrodynamic cavitation, stochastic model, cavitation bubbles, stochastic energy, distribution function.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.4.024-029

Энергетическая промышленная отрасль активно эксплуатирует регулирующие клапаны, которые относятся к разряду энергетической арматуры и предназначены для решения широкого спектра задач по распределению потоков жидкостных сред, регулированию их скоростью, перепадами давлений, расходными характеристиками в рамках той или иной технологической операции. Необходимость обеспечения надежных и безопасных условий работы регулирующего оборудования в различных трубопроводных системах приводит проектировщиков данных устройств к проблеме борьбы с последствиями (эрозией стенок, шумом, вибрацией) эффекта кавитации, который разделяют на два типа – гидродинамический и акустический. В первом случае формирование кавитационных полостей происходит вследствие резкого падения давления жидкости при ее течении в проточной части клапана, во втором – вследствие распространения звуковых волн.

Часто разработка конструктивных особенностей указанного оборудования носит уникальный характер. Как показали проведенные исследования современного состояния данной проблемы на основе известных литературных источников [1], основным способом формирования условий для ослабления последствий кавитации является принцип разделения потоков транспортируемой среды, например, при многоступенчатом дросселировании и его дополнительной интенсификации с помощью распределительных сеток, дисков или цилиндров [2, 3].

Математическое описание начальной стадии образования кавитационных пузырей при работе регулирующих органов является одним из этапов разработки инженерной методики для расчета проектируемого оборудования специального назначения. Рассмотрим вопрос стохастического моделирования процесса образования пузырей при гидродинамической кавитации в проточной части регулирующего клапана с учетом физико-механических характеристик жидкостной среды и конструктивно-режимных параметров устройства. Отметим, что, согласно проведенному литературному анализу [4], начальная стадия гидродинамической кавитации, которую условно разделяют на паровую, газовую (нуклеоновую) и парогазовую, описывается с помощью детерминированного

(А) и стохастического (В) подходов, а также их комбинаций (С).

Традиционное моделирование поведения одиночного пузыря при решении уравнения типа Рэлея-Ламба (Рэлея-Плессета) относится к детерминированному методу (А) и имеет множество модификаций [5] в зависимости от рассматриваемых эффектов (диффузионных, инерционных, тепловых). Стохастический подход (В), как правило, реализуется в задачах описания нуклеации [6] – гомогенной (в жидкости без примесей) и гетерогенной (в жидкостях с примесями, у гладких и негладких стенок), а также известны гомогенные модели, дополненные фактором гетерогенности [7] (в жидкостях с абразивными включениями малых размеров). При этом число зародышей, образующихся в единичном объеме за выделенный временной отрезок, определяется экспоненциальной зависимостью от указанного фактора гетерогенности и числа Гиббса, связывающего энергию формирования критического нуклеона с температурой жидкости и постоянной Больцмана. В последнее время активно развивается комбинированный подход (С), в котором к детерминированной модели движения континуума (несущей фазы) в переменных Эйлера добавляется модель поведения дисперсной фазы в переменных Лагранжа с привлечением стохастического описания частоты нуклеации [8]. Однако применяемые при этом дифференциальные распределения зародышей кавитации по их размерам обычно постулируются, в частности в [8] выбраны формы нормального, логнормального и равновероятного законов.

Предлагается в рамках формализма процесса Орнштейна-Уленбека макросистему кавитационных пузырей, образующихся в проточной части регулирующего клапана, считать энергетически замкнутой по ансамблю Гиббса, микроскопическими параметрами которого могут служить выбранные координаты и импульсы Гамильтона для каждой из одинаковых подсистем. При этом равновесная функция распределения состояния данных пузырей является решением уравнения Фоккера-Планка [9] при наличии диффузионного и дрейфового слагаемых. Выбор элемента фазового объема $d\Omega$ в зависимости от двух переменных (радиуса пузыря r и скорости движения его центра масс v)

после их обезразмеривания ($\xi = r/r_{\min}$; $\eta = v/v_L$), например, соответственно по минимальному значению радиуса r_{\min} и скорости течения жидкостной среды v_L в области образования кавитационных полостей, приводит к выражению

$$d\Omega = drdv = r_{\min}v_L d\xi d\eta. \quad (1)$$

Построение дифференциальной функции распределения числа N кавитационных пузырей по радиусам вида $F(r) \equiv N^{-1}(dN/dr)$ определяется зависимостью

$$f(\xi) \equiv N^{-1}(dN/d\xi) \quad (2)$$

в случае, когда число пузырей dN в элементе фазового объема $d\Omega$ пропорционально экспоненциальному убыванию стохастической энергии $E(\xi, \eta)$ каждого из них

$$dN = A \exp[-E(\xi, \eta)/E_0] d\Omega. \quad (3)$$

Входящие в выражение (3) параметры (нормировочный A и энергетический E_0) с учетом (1) и (2) вычисляются согласно следующим уравнениям:

$$A = N^{-1} \int_{\Omega} \exp[-E(\xi, \eta)/E_0] d\Omega; \quad (4)$$

$$E_1 = E_2, \quad (5)$$

где E_1 – стохастическая энергия для макросистемы

$$E_1 = \int_{\Omega} E(\xi, \eta) dN; \quad (6)$$

E_2 – энергия, затраченная на гидравлический разрыв жидкости за временной промежуток $\Delta\tau$ при площади условного прохода ω_y

$$\Delta\tau = 4\pi r_{\min}^3 / (3\omega_y v_L) \int_{\Omega} \xi^3 dN. \quad (7)$$

Значение E_2 в уравнении энергетического баланса (5) складывается из кинетической энергии движения пузыря в транспортируемом потоке жидкости, энергии взаимодействия с окружающей средой и энергии образования его поверхности:

$$E_2 = \left[r_{\min}^3 \lambda_1 \int_{\Omega} \xi^3 dN + \lambda_2 / (r_{\min} \xi) \right] v_L^2 + (8/3)\pi^{3/2} r_{\min}^3 \sigma \omega_y^{1/2} \int_{\Omega} \xi^3 dN, \quad (8)$$

где $\lambda_1 \equiv 2\pi(\alpha_g \rho_g + \alpha_s \rho_s) / 3$; $\lambda_2 \equiv k_c (\zeta_1 + \zeta_2) \rho_L / 4$; σ – коэффициент поверхностного натяжения; α_g и α_s – объемное содержание газа и пара в образованной полости кавитационного пузыря; ρ_g , ρ_s и ρ_L – плотности газа, пара и жидкости; k_c – коэффициент пропорциональности; ζ_1 и ζ_2 – составляющие полного коэффициента гидравлического сопротивления для переходной области течения жидкости, в которой образуются пузыри в пределах изменения критерия Рейнольдса $10 < Re < 10^4$ согласно принципу суперпозиции местных потерь [10, 11]. Значение ζ_1 соответствует ламинарному режиму течения среды в проточной части клапана при $Re \leq 10$, а ζ_2 – турбулентному при $Re \geq 10^4$.

Оценка ζ_1 и ζ_2 может быть произведена по справочным формулам в зависимости от физико-механических характеристик жидкости (вязкости μ) и внутренних поверхностей клапана (абсолютной эквивалентной шероховатости k_{01}), а также от набора конструктивных параметров регулирующего устройства. Например, в случае углового односедельного клапана известно [10]:

$$\zeta_1 = 64(Re D_y)^{-1} \left\{ \sum_{j=1}^{n_j-1} L_j + \omega_y^2 \left[L_{n_j} \omega_2^{-2} + \omega_3^{-2} (h/z + u)(D_{z1} + D_{z2}) \right] \right\}; \quad (9)$$

$$\zeta_2 = 0,11 (\omega_y / \omega_2)^2 (k_{01} / D_y)^{1/4} (L / D_y) \times \left\{ 1 + \left((\omega_2 / \omega_y) \left[1 + (k_{02} [1 - (\omega_3 / \omega_1)^2])^{1/2} \right] - 1 \right)^2 \right\}, \quad (10)$$

где L и L_j – длины прямолинейных каналов проточной части; h и z – длина канала и ширина зазора дроссельного прохода, дополнительно рассчитываемые по значениям диаметров условного прохода D_y , цилиндрической части золотника D_{z1} , площадки сечения его конической части D_{z2} при закрытии проходного зазора; ω_y , ω_1 (ω_2), ω_3 – площади сечений для условного прохода до (после) внезапного расширения для проходного сечения; k_{01} – степень остроты кромок проходного сечения; u – экспериментальная константа, определяемая отношением D_{z2}/D_{z1} и значением коэффициента вязкости жидкости μ .

Таким образом, задание стохастической энергии одиночного пузыря $E(\xi, \eta)$, входящей в выражения (3)–(6), определяет искомую дифференциальную функцию распределения числа кавитационных пузырей по их размерам в форме (2). Считая, что указанная энергия складывается из нескольких слагаемых: кинетических энергий для движения пузыря в транспортируемой среде и для внутреннего вихревого движения газа и пара; энергий образования для кавитационной полости при действии давления жидкости P_1 , равного давлению насыщенного пара P_s , и для свободной поверхности сферы; энергии заполнения пузыря конденсированным паром; энергии взаимодействия пузыря с окружающей жидкостью с учетом формулы Вейсбаха для перепада давления в клапане, выражение для расчета $E(\xi, \eta)$ принимает вид

$$E(\xi, \eta) = v_L^2 \eta^2 \varphi_1(\xi) + \varphi_2(\xi), \quad (11)$$

где при $\lambda_3 \equiv 5\lambda_1/8$; $\lambda_4 \equiv 4\pi\sigma$; $\lambda_5 \equiv 8\pi P_s/3$ введены функции:

$$\varphi_1(\xi) \equiv (\lambda_1 r_{\min}^4 \xi^4 + \lambda_2) r_{\min}^{-1} \xi^{-1}; \quad (12)$$

$$\varphi_2(\xi) \equiv \lambda_3 M^2 r_{\min}^{-5} \xi^{-5} + (\lambda_4 + \lambda_5 r_{\min} \xi) r_{\min}^2 \xi^2. \quad (13)$$

Входящее в выражение (13) значение случайной компоненты момента импульса для одиночного пузыря M можно вычислить с помощью следующего соотношения между давлениями в центре пузыря – в процессе его об-

разования P_s и при максимальном значении P_{\max} , когда достигается минимальный радиус [12]:

$$(P_{\max} / P_s)^{1/k} = (r_s / r_{\min})^3, \quad (14)$$

где k – показатель адиабаты.

Принимая условие равенства радиуса пузыря в стадии образования его усредненному значению $r_s = \langle r \rangle$, из (14) с учетом (3) и (11) следует

$$r_{\min} g_0 b_0 N^{-3} \beta^{-3} = \int_0^1 \xi [E_0 / \varphi_1(\xi)]^{1/2} \times \times \operatorname{erf} \left(v_L [\varphi_1(\xi) / E_0]^{1/2} \right) \exp [-\varphi_2(\xi) / E_0] d\xi, \quad (15)$$

где $\beta \equiv (P_{\max} / P_s)^{1/k} r_{\min}^3$;

$$g_0 \equiv [\varphi_1(1) / E_0]^{1/2} \operatorname{erf} \left\{ [E_0 / \varphi_1(1)]^{1/2} / v_L \right\}; \quad (16)$$

$$b_0 \equiv \exp [-\varphi_2(1) / E_0]. \quad (17)$$

Решение уравнения (15) в линейном приближении относительно аргумента ξ для подынтегральных функций (экспоненциальной и ошибок) при $c_2 \equiv (2\lambda_4 + 3\lambda_5 r_{\min}) r_{\min}^2$ принимает вид

$$M = \left\{ (r_{\min}^5 / 5\lambda_3) [3E_0(2\beta^{1/3} - 1) - c_2] \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

Согласно (2) и (11) получена следующая явная форма дифференциальной функции распределения числа кавитационных пузырей по параметру ξ :

$$f(\xi) = B_0 [E_0 / \varphi_1(\xi)]^{1/2} \times \times \operatorname{erf} \left(v_L [\varphi_1(\xi) / E_0]^{1/2} \right) \exp [-\varphi_2(\xi) / E_0], \quad (19)$$

где $c_0 \equiv 8\pi^{3/2} / (3\omega_y) - \lambda_5$ и $c_4 \equiv v_L^2 (\lambda_1 r_{\min}^4 + \lambda_2)$;

$$B_0 \equiv c_0^2 \left\{ 4r_{\min} [3^{-1} g_1 b_1 + (g_0 - g_1) \times \times (b_0 - b_1) + 2^{-1} [g_1(b_0 - b_1) + b_1(g_0 - g_1)]] \right\}^{-1}; \quad (20)$$

$$b_1 \equiv b_0 (5\lambda_3 M^2 r_{\min}^{-5} - c_2) / E_0; \quad (21)$$

$$g_1 \equiv \frac{c_4}{c_5 v_L} \left\{ \pi^{-1/2} v_L \exp [-c_4 (E_0 r_{\min})^{-1}] - 2^{-1} g_0 \right\}. \quad (22)$$

Значение стохастической энергии

$$E_0 = c_0 \left\{ g_0 [3c_2 + (c_2 - c_3 r_{\min}) g_1 / g_0 + + 15c_0 r_{\min}^3] + 60c_1 c_4 \right\} / \left\{ 2\pi^2 g_0 [2\beta^{1/3} - 1] \times \times (3 + g_1 / g_0) c_2 - 20r_{\min} (1 + c_1) \right\}, \quad (23)$$

входящее в выражения (3), (16)–(19), (21), (22), с учетом (6) и (8) в представлении разложения в ряд Маклорена функций вида $\exp(-x) = 1 - x + O(x^2)$; $\operatorname{erf}(x) = 2\pi^{-1/2} x + O(x^3)$ определяется из уравнения энергетического баланса (5):

$$3^{-1} \lambda_4 r_{\min} [1 - g_1 / (4g_0)] - 4^{-1} c_0 r_{\min}^2 [1 - -g_1 / (5g_0)] - \lambda_3 M^2 (4r_{\min})^{-1} [1 + g_1 / (3g_0)] - -c_1 c_4 g_0^{-1} r_{\min}^{-1} = 0. \quad (24)$$

В выражение (23) и уравнение (24) входят:

$$c_1 \equiv \lambda_1 r_{\min}^3 J_{11} + \lambda_2 r_{\min}^{-1} J_{12}; \quad J_{11} \equiv \int_0^1 \xi^4 (\lambda_1 r_{\min}^4 \xi^4 + \lambda_2) d\xi;$$

$$J_{12} \equiv \int_0^1 (\lambda_1 r_{\min}^4 \xi^4 + \lambda_2) d\xi; \quad c_3 \equiv 3r_{\min} (5\lambda_4 + c_0 r_{\min}).$$

При этом значения параметров g_{01} и g_{11} рассчитываются согласно (12), (16) и (22):

$$g_{01} = (r_{\min} v_L^2 / c_4)^{1/2} \operatorname{erf} [c_4 / (r_{\min} v_L^2)]; \quad (25)$$

$$g_{11} = \frac{c_4}{c_5 v_L} \left[\pi^{-1/2} v_L g_{01}^{-1} \exp(-c_4 / r_{\min}) - 2^{-1} \right]. \quad (26)$$

В качестве примера приведем результаты расчета искомой дифференциальной функции распределения числа пузырей по параметру ξ в начальной стадии гидродинамической кавитации в проточной части регулирующего клапана осевого типа (рис. 1, 2) в соответствии с выражением (19).

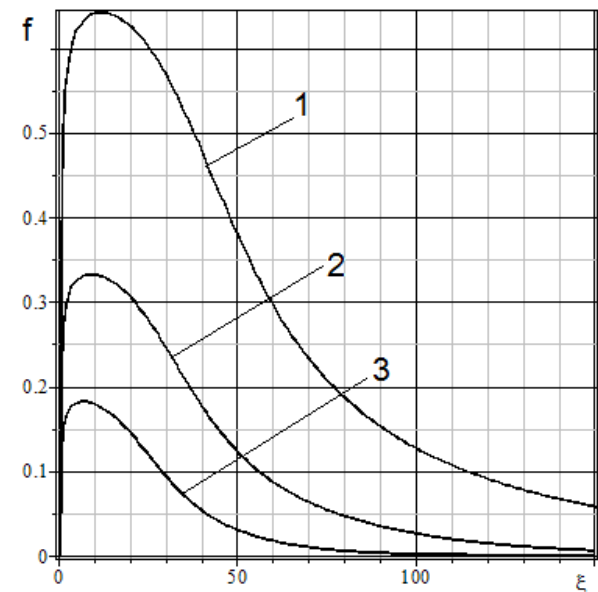


Рис. 1. Зависимость $f(\xi)$ для дифференциальной функции распределения числа пузырей по параметру ξ в начальной стадии гидродинамической кавитации в проточной части регулирующего клапана осевого типа при различных сечениях условного прохода: $\alpha_g = \alpha_s = 0,5$; $K_{vg} = 0,44 \text{ м}^3/\text{с}$; 1 – $\omega_y = 0,143 \text{ м}^2$; $E_0 = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$; $M = 6,1 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$; 2 – $\omega_y = 0,218 \text{ м}^2$; $E_0 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$; $M = 2,7 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$; 3 – $\omega_y = 0,308 \text{ м}^2$; $E_0 = 3,73 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$; $M = 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

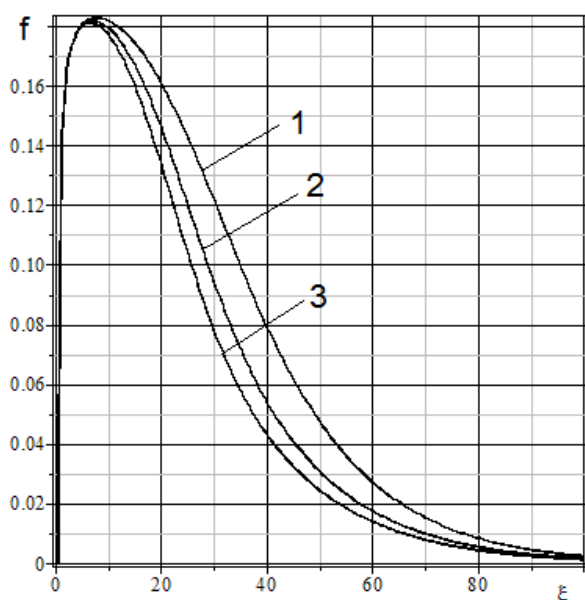


Рис. 2. Зависимость $f(\xi)$ для дифференциальной функции распределения числа пузырей по параметру ξ в начальной стадии гидродинамической кавитации в проточной части регулирующего клапана осевого типа при различных соотношениях системы газ-пар: $\omega_y = 0,308 \text{ м}^2$; $K_{vy} = 0,44 \text{ м}^3/\text{с}$; $E_0 = 3,73 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$; 1 — $\alpha_s = 0,8$; $M = 1,74 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$; 2 — $\alpha_s = 0,5$; $M = 1,38 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$; 3 — $\alpha_s = 0,2$; $M = 8,87 \cdot 10^{-11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$

Вычисление значения полного коэффициента гидравлического сопротивления, входящего в выражение для определения коэффициента λ_2 для переходной области течения жидкости, в которой образуются пузыри в проточной части регулирующего клапана, производится по справочной формуле [14]

$$\zeta_{12} = \zeta_1 + \zeta_2 = [K_{vy} / (5,04 \omega_y \rho_L)]^2, \quad (27)$$

где K_{vy} — условная пропускная способность клапана.

Входными данными для расчета являются: $\rho_g = 1,205 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_s = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ кг}/\text{м}^3$; $\rho_L = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\sigma = 7,284 \cdot 10^{-4} \text{ Н}/\text{м}$; $K_{vy} = 0,44 \text{ м}^3/\text{с}$; $k = 1,3$; $P_s = 10^{-3} \text{ Па}$; $\omega_y = (0,14-0,31) \text{ м}^2$. Согласно сведениям [13] принято: $P_{\max} = 1,3 \cdot 10^8 \text{ Па}$; $r_{\min} = 10^{-3} \text{ м}$. При этом получены следующие диапазоны изменения характеристических параметров процесса образования пузырей: $E_0 = (3,7-73,0) \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$; $M = (8,9-17,4) \cdot 10^{-11} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$.

Анализ графиков 1–3 (рис. 1) для зависимости $f(\xi)$ показывает, что наиболее вероятное значение параметра ξ образующихся кавитационных пузырей при равных пропорциях объемного содержания газа и пара в их полостях меняется в пределах $\xi^* = (5-12)$ при изменении площади условного проходного сечения в диапазоне $\omega_y = (0,143-0,308) \text{ м}^2$. Указанным пределам для ξ и ω_y соответствуют следующие значения радиусов образующихся пузырей: $r^* = (0,5-1,2) \cdot 10^{-2} \text{ м}$. При этом с уменьшением площади условного проходного сечения в 2,15 раза пиковые значения дифференциаль-

ной функции распределения числа пузырей увеличиваются более чем в 3 раза, что отражено на графиках 3 ($\omega_y = 0,308 \text{ м}^2$) и 1 ($\omega_y = 0,143 \text{ м}^2$) (рис. 1). Наличие участков графиков 1–3 со значениями параметра $\xi \gg \xi^*$ отражает вероятность объединения соседних пузырей в полости большего объема, которая возрастает с убыванием значения ω_y . Известно [15], что с повышением температуры вследствие возможного адиабатического сжатия газа при значительном превышении его объемной доли в системе газ-пар наблюдаются пульсации пузыря, что объясняет возможное образование кавитационных пузырей с меньшим радиусом (рис. 2, график 3) для $\alpha_s = 0,2$, чем при большем значении $\alpha_s = 0,8$ (рис. 2, график 1). В то же время для развитого этапа эволюции кавитации сжатие пузырей ускоряется с уменьшением содержания газа в его полости, так как на фазовой границе наблюдается конденсация пара [15].

Таким образом, полученные результаты для описания процесса образования кавитационных пузырей на начальном этапе гидродинамической кавитации в проточной части регулирующего клапана могут быть использованы при оценке усредненных значений размеров одиночного пузыря, общего объема кавитационных полостей, времени образования полости указанного объема, необходимых для формирования инженерных методик расчета проектируемых регулирующих органов.

Список литературы

1. **О способах** оценки критических параметров кавитации в регулирующих органах при транспортировании рабочих сред / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер и др. // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 3 (ч. 3). – С. 488–494.
2. **Ионатис Р.Р., Чеков М.Е.** Интенсификация дросселирования проточной части регуляторов расхода среды // *Атомная энергия*. – 2012. – Т. 112, вып. 5. – С. 263–269.
3. **Безкавитационный** регулятор давления шарового типа / О.Н. Полетаев, Р.М. Гиниятов, И.А. Флегентов, О.Ю. Жевелев // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2014. – № 4(16). – С. 60–63.
4. **О методах** моделирования основных стадий развития гидродинамической кавитации / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер и др. // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 3 (ч. 2). – С. 268–273.
5. **Си-Дин-Ю.** Некоторые аналитические аспекты динамики пузырьков // *Труды американского общества инженеров-механиков*. Сер. Д. – 1965. – Т. 87, № 4. – С. 157–174 (пер. с англ.).
6. **Френкель Я.И.** Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука, 1959. – 586 с.
7. **Alamgi Md., Lienhard J.H.** Correlation of pressure undershoot during hot-water depressurization. *Journal of Heat Transfer*. – 1981. – Vol. 103, № 1. – P. 52–55. doi: 10.1115/1.3244429.
8. **Кумзерова Е.Ю., Шмидт А.А.** Численное моделирование нуклеации и динамики пузырьков при быстром падении давления жидкости // *Журнал технической физики*. – 2002. – Т. 2, № 7. – С. 36–40.
9. **Климонтвич Ю.Л.** Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.

10. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1970. – 216 с.
11. **О методах** расчета гидравлического сопротивления регулирующих органов при транспортировании одноконпонентных сред / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 4 (ч. 1). – С. 52–60.
12. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
13. Исследование вихревых и кавитационных потоков в гидравлических системах / Е.П. Запорожец, Л.П. Холпанов, Г.К. Зиберт, А.В. Артемов // *Теоретические основы химических технологий*. – 2004. – Т. 38, № 3. – С. 243–252.
14. **Арзуманов Э.С.** Гидравлические регулирующие органы систем автоматизированного управления. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
15. **Кнепп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.** Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.

References

1. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Mel'tser, A.M., Solopov, S.A., Serov, E.M. O sposobakh otsenki kriticheskikh parametrov kavitatsii v reguliruyushchikh organakh pri transportirovaniy rabochikh sred [On methods of evaluating critical cavitation parameters in regulating units while transporting working media]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 3(part 3), pp. 488–494.
2. Yonaytis, R.R., Chekov, M.E. Intensifikatsiya drosselirovaniya protochnoy chasti regulatorov raskhoda sredy [Intensification of flow area throttling in medium flow regulators]. *Atomnaya energiya*, 2012, vol. 112, issue 5, pp. 263–269.
3. Poletaev, O.N., Giniyatov, R.M., Flegentov, I.A., Zhevelev, O.Yu. Bez kavitatsionnyy regulator davleniya sharovogo tipa [Cavitation-free ball-type pressure regulator]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*, 2014, no. 4(16), pp. 60–63.
4. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Mel'tser, A.M., Neklyudov, S.V., Serov, E.M. O metodakh modelirovaniya osnovnykh stadiy razvitiya gidrodinamicheskoy kavitatsii [On methods of modeling the main stages of hydrodynamic cavitation development]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, № 3(part 2), pp. 268–273.
5. Xi-Ding-You. Nekotorye analiticheskie aspekty dinamiki puzyr'kov [Some analytical aspects of dynamic bubbles]. *Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya D* [Collected works of the American society of mechanical engineers]. 1965, vol. 87, no. 4, pp. 157–174.
6. Frenkel', Ya.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkostey* [Kinetic theory of liquids]. Leningrad, Nauka, 1959. 586 p.
7. Alamgir, Md., Lienhard, J.H. Correlation of pressure undershoot during hot-water depressurization. *Journal of Heat Transfer*, 1981, vol. 103, no. 1, pp. 52–55. doi: 10.1115/1.3244429.
8. Kumzerova, E.Yu., Shmidt, A.A. Chislennoe modelirovaniye nukleatsii i dinamiki puzyr'kov pri bystrom padenii davleniya zhidkosti [Numerical simulation of bubble nucleation and dynamics in case of fast liquid pressure drop]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2002, vol. 2, no. 7, pp. 36–40.
9. Klimontovich, Yu.L. *Turbulentnoye dvizhenie i struktura khaosa: Novyy podkhod k statisticheskoy teorii otkrytykh sistem* [Vortex flow and chaos structure]. Moscow, LENAND, 2014. 328 p.
10. Al'tshul', A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulic resistances]. Moscow, Nedra, 1970. 216 p.
11. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Mel'tser, A.M., Solopov, S.A., Neklyudov, S.V. O metodakh rascheta gidravlicheskogo soprotivleniya reguliruyushchikh organov pri transportirovaniy odnokomponentnykh sred [On methods of calculating regulating unit pressure at transportation of single-phase media]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 4 (part 1), pp. 52–60.
12. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat transfer caused by condensation]. Moscow, Energiya, 1977. 240 p.
13. Zaporozhets, E.P., Kholpanov, L.P., Zibert, G.K., Artemov, A.V. Issledovanie vikhrevykh i kavitatsionnykh potokov v gidravlicheskikh sistemakh [A study of vortex and cavitation flows in hydraulic systems]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskikh tekhnologiy*, 2004, vol. 38, no. 3, pp. 243–252.
14. Arzumano, E.S. *Gidravlicheskie reguliruyushchie organy sistem avtomatizirovannogo upravleniya* [Hydraulic regulating units of automatic control]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1985. 256 p.
15. Knepp, R., Deyli, Dzh., Khemmit, F. *Kavitatsiya* [Cavitation]. Moscow, Mir, 1974. 668 p.

Капранова Анна Борисовна,
ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет»,
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов,
e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Лебедев Антон Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет»,
кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта,
e-mail: lae4444@mail.ru

Мельцер Александр Михайлович,
ЗАО НПО «Регулятор» (г. Ярославль),
генеральный директор,
e-mail: meltzer.a@mail.ru

Неклюдов Сергей Владимирович,
ЗАО НПО «Регулятор» (г. Ярославль),
главный конструктор,
e-mail: neklydov.s@nporeg.ru