

УДК 532.517.6

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-376-11-117-121

Л.С. Прохасько

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

✉ prokhaskols@susu.ru

Поступила в редакцию:
01.08.2023

Одобрена после рецензирования:
27.10.2023

Принята к публикации:
09.11.2023

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-376-11-117-121

Lubov S. Prokhasko

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

✉ prokhaskols@susu.ru

Received by the editorial office:
01.08.2023

Accepted in revised:
27.10.2023

Accepted for publication:
09.11.2023

Расчет кавитационного устройства для очистки промышленных вод

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В настоящее время чрезвычайно остро стоит вопрос предотвращения загрязнения гидросферы сточными водами промышленных предприятий, применения новых эффективных технологий очистки промышленной воды и повторного ее использования на производстве. В связи с этим актуальными задачами являются поиск и внедрение новых способов водоочистки: инновационных технологий, дезинфекции и опреснения воды, методов повторного ее использования.

Методы. В статье предложена новая технология водоочистки: кавитационное воздействие на поток усилено ударным воздействием скачка давления, что позволяет подавить жизнедеятельность микроорганизмов в воде. На основе разработанного рабочего процесса, его математической модели и авторской методики выполнены расчеты трех гидродинамических кавитационных устройств со скачком давления с целью дезинтеграции сульфатвосстанавливающих бактерий промышленных вод.

Результаты. В соответствии с техническим заданием (номинальный расход жидкости Q , номинальное абсолютное давление перед установкой P_1 , допустимое падение давления на устройстве ΔP , номинальная температура жидкости t , физические свойства среды) на базе предложенного рабочего процесса гидродинамического кавитационного устройства, формирующего сверхзвуковое течение с переходом в дозвуковой через скачок давления, соответствующей математической модели и адекватной методики были рассчитаны режимные и геометрические параметры трех опытно-промышленных образцов гидродинамических кавитационных устройств, предназначенные для деструктуризации сульфатвосстанавливающих бактерий промышленных вод. Чтобы сформировать сверхзвуковое течение в установке при выполнении достаточно строгих условий по обеспечению допустимых перепадов давления, было спроектировано сопло с минимальным коэффициентом сопротивления по кривой Виташинского. Промышленная апробация кавитационных устройств показала хорошую сходимость теоретических и опытных данных: подавление бактерий было осуществлено на 80–100%.

Ключевые слова: кавитация, гидродинамическое устройство, скачок давления, рабочий процесс

Для цитирования: Прохасько Л.С. Расчет кавитационного устройства для очистки промышленных вод. *Аграрная наука.* 2023; 376(11): 117–121. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-117-121>

© Прохасько Л.С.

Calculation of a cavitation device for industrial water treatment

ABSTRACT

Relevance. Currently, the issue of preventing pollution of the hydrosphere by industrial wastewater, the use of new effective technologies for industrial water purification and its reuse in production is extremely acute. In this regard, the urgent tasks are the search and implementation of new methods of water treatment: innovative technologies, disinfection and desalination of water, methods of its reuse.

Methods. The article proposes a new technology for water treatment — the cavitation effect on the flow is enhanced by the shock effect of a pressure surge, which makes it possible to suppress the vital activity of microorganisms in the water. On the basis of the developed workflow, its mathematical model and the author's methodology, calculations were made for three hydrodynamic cavitation devices with a pressure jump in order to disintegrate sulfate-reducing bacteria in industrial waters.

Results. In accordance with the terms of reference (nominal fluid flow Q , nominal absolute pressure before installation P_1 , allowable pressure drop on the device ΔP , nominal fluid temperature t , physical properties of the medium) based on the proposed working process of a hydrodynamic cavitation device that forms a supersonic flow with a transition to subsonic through a pressure jump, an appropriate mathematical model and an adequate technique, the regime and geometric parameters of three pilot samples of hydrodynamic cavitation devices designed to destructure sulfate-reducing bacteria in industrial waters were calculated. In order to form a supersonic flow in the installation under sufficiently strict conditions for ensuring permissible pressure drops, a nozzle was profiled with a minimum drag coefficient along the Vitashinsky curve. Industrial testing of cavitation devices showed good convergence of theoretical and experimental data: the suppression of bacteria was carried out by 80–100%.

Key words: cavitation, hydrodynamic device, pressure surge, working process

For citation: Prokhasko L.S. Calculation of a cavitation device for industrial water treatment. *Agrarian science.* 2023; 376(11): 117–121 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-117-121>

© Prokhasko L.S.

Введение/Introduction

Около 20% всех мировых ресурсов воды приходится на Российскую Федерацию (РФ). Казалось бы, в нашей стране нет проблем с водными запасами. Однако в РФ (как, впрочем, и в других странах) остро стоит вопрос обеспечения надлежащего качества как питьевой, так и промышленной воды [1–3]. Техническое старение, изношенность оборудования систем водоснабжения и водоочистки, конечно, влияют на ухудшение качества воды, и их своевременный ремонт (или замена) призван решить проблему улучшения качества воды. Но в условиях всё возрастающей численности населения, развития сельскохозяйственного и промышленного производства этих усилий оказывается недостаточно: 40% поверхностных и 20% подземных источников водозабора не соответствуют нормативам из-за химических, физических и биологических загрязнителей, как производственной среды, так и загрязнителей, вследствие жизнедеятельности самого населения. Из общего объема водопотребления промышленными предприятиями используется только 20–25% воды питьевого качества, поэтому в настоящее время чрезвычайно остро стоит вопрос предотвращения загрязнения гидросферы сточными водами промышленных предприятий, применения новых эффективных технологий очистки промышленной воды и повторного ее использования на производстве. В связи с этим актуальными задачами являются поиск и внедрение новых способов водоочистки: инновационных технологий, дезинфекции и опреснения воды, методов повторного ее использования [4]. Учитывая масштабность задачи, эти методы и меры должны быть экономически выгодными и целесообразными.

Широко известны вредные последствия кавитационных явлений: ухудшение энергетических характеристик оборудования, кавитационная эрозия поверхностей, шум и вибрация. Вопросы же, связанные с полезным применением кавитации, до недавнего времени были изучены не столь полно. Только последние 20–30 лет кавитационные технологии обработки жидких сред получили широкое применение в различных сферах и отраслях промышленности: теплоэнергетике и машиностроении, химической и лакокрасочной промышленности, биотехнологии и пищевых технологиях [5–9]. Причем научные исследования осуществляются как в поиске новых решений и оптимизации самой кавитационной технологии, так и в совершенствовании устройств, реализующих эту технологию [10, 11].

В зависимости от способа получения различают ультразвуковую и гидродинамическую кавитацию. Ультразвуковая кавитация возникает при понижении давления в результате прохождения в жидкой среде высокочастотной звуковой волны, источником которой является реактор. Гидродинамическая кавитация возникает при локальном разгоне потока до скорости, при которой давление падает до давления насыщенного пара. При этом из жидкости выделяются в виде мельчайших парогазовых пузырьков ранее растворенные в жидкости газовые включения. Поток переходит в двухфазный — смесь жидкости и парогазовых пузырьков. Если бы жидкость была идеальной однородной чистой жидкостью, то для возникновения кавитации потребовались бы гораздо большие растягивающие напряжения. Но в реальных жидкостях всегда есть зародыши кавитации — микроскопические газовые пузырьки, которые распределены по всему объему жидкости и располагаются в трещинах и порах твердых микрочастиц, находящихся в жидкости. Эти зародыши в условиях пониженного давления

начинают расти за счет диффузии газа из жидкости в пузырьки и испарения жидкости. При перемещении потока в область повышенных давлений происходит схлопывание пузырьков. При схлопывании пузырьков за короткий промежуток времени (порядка 1–10 нс) происходит значительное повышение давления и температуры — до 5000 ат и $1,5 \times 10^4$ К соответственно [12, 13]. Такие множественные точечные микроудары носят волновой характер, создают кавитационные колебания, которые интенсифицируют на микроуровне физико-химические процессы взаимодействия в жидкости, тем самым запускают режим диспергирования компонентов жидкой среды, обеззараживания и пр. Этот механизм и лежит в основе кавитационной технологии.

Известна технология гидроволнового воздействия, применяемая в системах водоподготовки и очистки промышленных сточных вод: волновой процесс в жидкости возникает за счет инициирования кавитационных явлений. Так, широко применяется система гидродинамической очистки воды (ГДВУ), в основе которой лежит кавитационная технология. В зависимости от состояния воды ГДВУ применяют и как систему для полной очистки воды, и для предварительной очистки. Простота конструкции и эффективность работы ГДВУ обеспечивают хорошее качество воды в системах водоподготовки.

Подтвержденные многочисленные опытные данные и теоретические исследования [13] свидетельствуют о низких значениях скорости звука в газожидкостных средах: скорость звука в них на порядок и на два порядка ниже, чем в газовой и жидкостной среде соответственно. Это легко объяснить: значение скорости звука определяется сжимаемостью среды. Сжимаемость газожидкостного потока, состоящего из капельной (малосжимаемой) жидкости относительно большой плотности и сжимаемых парогазовых пузырьков, оказывается выше, чем даже у газа или пара.

Напрашивается логический вывод: если сформировать в кавитационном процессе двухфазную среду, то можно процесс рассчитать таким образом, чтобы скорость такого потока была выше скорости звука, то есть создать сверхзвуковое течение двухфазной среды. Сверхзвуковое течение потока в реальных условиях трения ограничивающих поверхностей сопровождается повышением давления и перейдет в дозвуковое через скачок давления, что явится дополнительным мощным фактором воздействия на поток. Анализ работы гидродинамических кавитационных устройств данного типа приведен в [13–15].

Материалы и методы исследования / Materials and methods

На рисунке 1 схематично показан рабочий процесс гидродинамического кавитационного устройства, реализующий механизм перехода потока рабочей жидкости через скачок давления.

Математическая модель, описывающая данный рабочий процесс, приведена в [13–15]. Строгость и точность расчетов зависят от применяемого метода расчета. Разработанный метод расчета, в соответствии с которым выполнены расчеты опытно-промышленных образцов кавитационных устройств, показан в [13].

Исходными данными для расчета опытно-промышленных образцов гидродинамических кавитационных установок являются номинальный и фактический расход жидкости Q , номинальное и фактическое абсолютное давление перед установкой P_1 , допустимое падение давления на устройстве ΔP , номинальная и фактическая

Рис. 1. Рабочий процесс кавитационного устройства со скачком давления

Fig. 1. The working process of the cavitation device with a pressure surge



температура жидкости t , физические свойства среды. Количество опытных образцов, привязанных к конкретным объектам (в дальнейшем именуемых «I вариант», «II вариант» и «III вариант» соответственно), — три. Так как техническим заданием (ТЗ) были установлены допустимые падения давления ΔP по отношению к фактическим давлению перед установками P_1 для всех трех вариантов, то дальнейшие расчеты выполнены для фактических параметров, заданных ТЗ. Числовые значения некоторых исходных параметров для трех вариантов приведены в таблице 1.

Задача расчета — обеспечение геометрии проточной части гидродинамических кавитационных установок, отвечающей повышению скорости (на срезе сопла в струйном пограничном слое) до такой величины, при которой происходит падение давления до давления насыщенного пара, формированию на начальном участке рабочей камеры за побудителями кавитации сверхзвукового течения, переходящего в конце рабочей камеры в дозвуковое в скачке давления, и удовлетворяющей техническому заданию. На рисунке 2 показана принципиальная схема гидродинамической кавитационной установки, кавитационное устройство 1 которого выполнено в виде одноструйного сопла. M_1-M_5 — места установки манометров для регистрации давления вдоль проточной части кавитационной установки.

Рис. 2. Принципиальная схема гидродинамической кавитационной установки

Fig. 2. Schematic diagram of a hydrodynamic cavitation unit

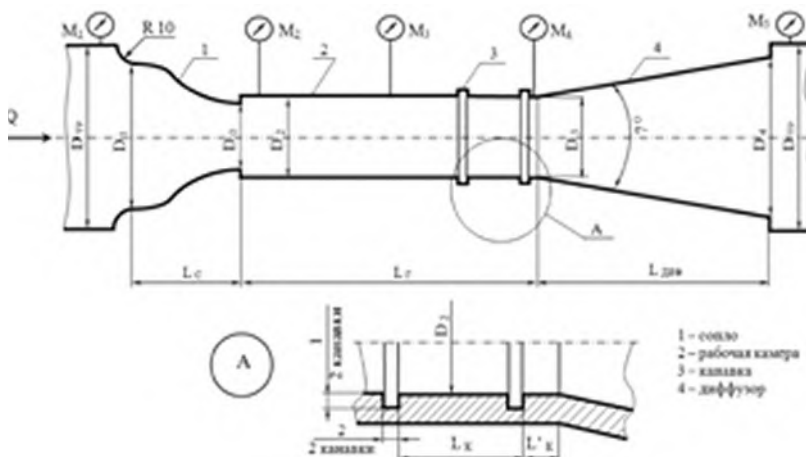


Таблица 1. Исходные данные для расчета кавитационной установки

Table 1. Initial data for the calculation of the cavitation installation

№ п/п	Параметр		Значения		
	Наименование	Обозначение, размерность	I вариант	II вариант	III вариант
1	Подача	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,00463	0,0625	0,0484
2	Абсолютное давление на входе в устройство	$P_1, \text{ МПа}$	14,1	13,1	13,6
3	Допустимое падение давления на установке	$\Delta P, \text{ МПа}$	2	1,5	3,5
4	Температура среды	$T, ^\circ\text{C}$	55	60	54

Таблица 2. Режимные и геометрические параметры расчета

Table 2. Mode and geometric parameters of the calculation

Параметр	Наименование	Обозначение, размерность	Значения		
			I вариант	II вариант	III вариант
Диаметр рабочей камеры	$D_3, \text{ мм}$		6,95	25,41	25,3
Диаметр сопла	$D_2, \text{ мм}$		6,33	23,56	21,17
Диаметр выходного сечения диффузора	$D_4, \text{ мм}$		17	62,2	62
Угол раскрытия диффузора	$Q_{\text{диф}}, ^\circ$		7		
Площадь соплового отверстия	$A_2, \text{ мм}^2$		31,45	435,73	351,81
Площадь нормального сечения рабочей камеры	$A_3, \text{ мм}^2$		37,92	506,85	502,47
Относительная площадь сопла	$W = A_2/A_3$		0,83	0,86	0,7
Длина рабочей камеры	$L_r, \text{ мм}$		450	1400	1000
Длина диффузора	$L_{\text{диф}}, \text{ мм}$		40	150	150
Длина сопла не менее:	$L_{\text{соп}}, \text{ мм}$		25,2	94,4	84,8

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Гидродинамический расчет кавитационных установок (рис. 2), реализующих протекание рабочего процесса через скачок давления (рис. 1), выполнен по авторской методике, приведенной в [3]. Некоторые режимные и геометрические параметры этой схемы, рассчитанные для трех вариантов, приведены в таблице 2.

Так как для формирования сверхзвукового течения в установке давление за кавитационным устройством (соплом) (рис. 2) должно быть меньше либо равно давлению насыщенного пара $P_{\text{н.п.}}$, то это означает большие перепады давления на самом кавитационном устройстве при значительном давлении перед установкой P_1 (для всех трех вариантов). Это, в свою очередь, определяет большие скорости истечения из сопла.

Достаточно строгие условия по обеспечению допустимых перепадов давления ΔP на самой гидродинамической кавитационной установке, а также большие скорости истечения из сопла, определяемые физикой сверхзвуковых течений, обуславливают применение «идеально» спрофилированного сопла с минимальным коэффициентом сопротивления (например, по кривой Виташинского). На рисунке 3 приведен профиль сопла по кривой Виташинского, а в таблице 3 — геометрические параметры сопла для I, II и III вариантов соответственно.

Относительные перепады давления на установке, близкие к нулю (для I варианта — 0,14, для II варианта — 0,12, для III варианта — 0,26), означают,

Рис. 3. Профилирование сопла по кривой Виташинского
Fig. 3. Nozzle profiling along the Vitashinsky curve

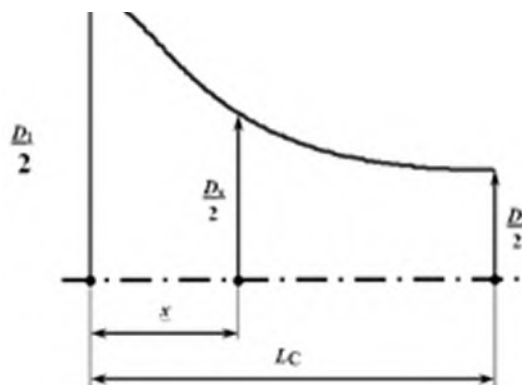


Таблица 3. Геометрические параметры сопла по кривой Виташинского

Table 3. Geometric parameters of the nozzle according to the Vitashinsky curve

I вариант		II вариант		III вариант	
$D_1 = 0,01575 \text{ м},$ $D_2 = 0,0063 \text{ м},$ $L_c = 0,0252 \text{ м}$		$D_1 = 0,059 \text{ м},$ $D_2 = 0,0236 \text{ м},$ $L_c = 0,0944 \text{ м}$		$D_1 = 0,01575 \text{ м},$ $D_2 = 0,0063 \text{ м},$ $L_c = 0,0252 \text{ м}$	
$x, \text{ м}$	$D_{x1}, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$D_{x1}, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$D_{x1}, \text{ м}$
0	0,01575	0	0,059	0	0,053
0,00126	0,0154497	0,00472	0,057875	0,00424	0,0519894
0,00252	0,0146514	0,00944	0,0548846	0,00848	0,0493031
0,00378	0,0135817	0,01416	0,0508774	0,01272	0,0457034
0,00504	0,0124511	0,01888	0,0466423	0,01696	0,041899
0,0063	0,0113888	0,0236	0,0426627	0,0212	0,0383242
0,00756	0,0104504	0,02832	0,0391476	0,02544	0,0351665
0,00882	0,0096482	0,03304	0,0361424	0,02968	0,0324669
0,01008	0,008974	0,03776	0,0336168	0,03392	0,0301982
0,01134	0,0084125	0,04248	0,0315136	0,03816	0,0283088
0,0126	0,0079476	0,0472	0,0297718	0,0424	0,0267442
0,01386	0,0075643	0,05192	0,028336	0,04664	0,0254544
0,01638	0,0069943	0,06136	0,0262008	0,05512	0,0235363
0,1764	0,0067886	0,06608	0,0254304	0,05936	0,0228443
0,0189	0,0066261	0,0708	0,0248217	0,0636	0,0222974
0,02016	0,0065012	0,07552	0,0243538	0,06784	0,0218771
0,02142	0,0064094	0,08024	0,02401	0,07208	0,0215683
0,02268	0,0063472	0,08496	0,0237766	0,07632	0,0213587
0,02394	0,0063115	0,08968	0,0236429	0,08056	0,0212386
0,0252	0,0063	0,0944	0,0236	0,0848	0,0212

что относительная площадь сопла $\Omega = A_2/A_3$ (A_2 и A_3 — площади сопла 1 и рабочей камеры 2 соответственно) (рис. 2) близка к единице (I вариант $\Omega = 0,83$, II вариант $\Omega = 0,86$, III вариант $\Omega = 0,7$). Это, а также вышеперечисленные факторы (большие скорости истечения из сопла, необходимость минимизации потерь давления на установке) обуславливают необходимость выполнения **следующих условий:**

- для всех вариантов применять только одноструйное сопло, спрофилированное по кривой Виташинского (рис. 3, табл. 3);
- строго выдерживать соосность сопла и рабочей камеры.

Для III варианта можно рекомендовать оригинальное сопло, спрофилированное также по кривой Виташинского и имеющее обтекаемую вставку для создания более

Рис. 4. Сопло с обтекаемой вставкой

Fig. 4. Streamlined nozzle

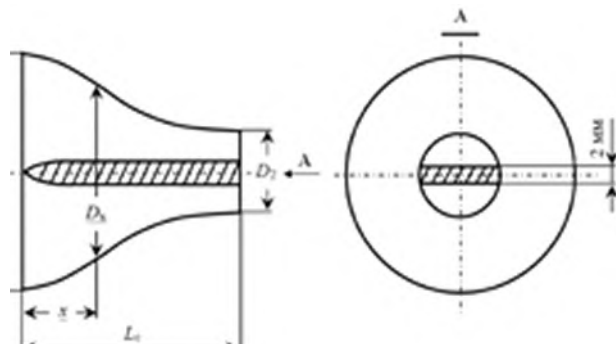


Таблица 4. Геометрические параметры сопла по кривой Виташинского с обтекаемой вставкой

Table 4. Geometric parameters of the nozzle according to the Vitashinsky curve with a streamlined insert

$D_1, \text{ м}$	$D_2, \text{ м}$	$L_c, \text{ м}$	$x_1, \text{ м}$	$D_{x1}, \text{ м}$	$x_1, \text{ м}$	$D_{x1}, \text{ м}$	$x_1, \text{ м}$	$D_{x1}, \text{ м}$
0,0575	0,023	0,092	0	0,0575	0,0322	0,0352236	0,0644	0,0247839
			0,0046	0,0564036	0,0368	0,0327622	0,069	0,0241906
			0,0092	0,0534892	0,0414	0,0307124	0,0736	0,0237346
			0,0138	0,0495839	0,046	0,0290149	0,0782	0,0233995
			0,0184	0,0454565	0,0506	0,0276156	0,0828	0,0231722
			0,023	0,0415781	0,0552	0,0264682	0,0874	0,0230418
			0,0276	0,0381523	0,0598	0,0255347	0,092	0,023

благоприятных условий вихреобразования на срезе сопла и, как следствие, дополнительному падению давления вплоть до давления насыщенного пара.

На рисунке 4 показано данное сопло, а в таблице 4 приведены его геометрические параметры. Диаметр соплового отверстия в этом случае ($D_2 = 23 \text{ мм}$) превышает диаметр соплового отверстия ($D_2 = 21,2 \text{ мм}$) (табл. 4), так как необходимо учитывать стеснение площади на срезе сопла вставкой, чтобы обеспечить численное значение относительной площади сопла $\Omega = 0,7$.

Выводы/Conclusion

Сравнивая два способа инициирования кавитационных явлений в устройствах различного типа (акустических и гидродинамических), можно сказать, что гидродинамическая кавитация обладает несравненными преимуществами: гидродинамические кавитационные устройства легко встраиваются в непрерывную технологическую линию, показывая высокую производительность и меньшие энергозатраты по сравнению с акустическими [6, 7].

Однако широкого практического применения эти устройства до сих пор не нашли, несмотря на простоту их конструкции (последовательно — конфузор, кавитатор, рабочая камера в виде цилиндрической трубы, в конце которой выполнены канавки для инициирования перехода сверхзвукового режима течения в дозвуковой, далее диффузор). Это можно объяснить тем, что расчет таких устройств достаточно сложен, требует детальной разработки рабочего процесса и соответствующей математической модели, учитывающей физику течения двухфазной среды.

Тот факт, что достижение сверхзвуковых течений в двухфазной среде не только возможно, но и легко осуществимо (приведенные выше теоретические и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что скорость звука в двухфазных потоках может принимать достаточно низкие значения), предложено

кавитационное устройство со сверхзвуковым режимом течения рабочей жидкости, который переходит в дозвуковой через мощный скачок давления, что является дополнительным диспергирующим воздействием на поток. Промышленная апробация кавитационного устройства, выполненного для подавления сульфатовосстанавливающих бактерий и рассчитанного по данному

методу, показала хорошую сходимость теоретических и опытных данных — подавление бактерий было осуществлено на 80–100%.

Таким образом, разработанная методика может быть применена для расчета устройств подобного типа, имеет практическую значимость и актуальность.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.
Автор несет ответственность за плагиат.

The author is responsible for the work and the data presented.
The author is responsible for plagiarism.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Новикова Ю.А., Копытенкова О.И. Контроль качества питьевой воды. *Контроль качества продукции*. 2022; (5): 32–36. <https://elibrary.ru/layovd>
- Ловкис З.В. Оценка показателей качества и безопасности питьевой и технической воды. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук*. 2023; 61(1): 78–86. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-1-78-86>
- Калачева О.А. Лабораторный контроль: проведение анализов питьевой воды и сточных вод. *Естественные и технические науки*. 2022; (2): 282, 283. <https://elibrary.ru/sdzqdi>
- Мухин А.Н., Кирюшин М.С. Почему чистая вода на промышленных объектах так важна для предприятий? *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2018; (4): 8–12. <https://elibrary.ru/yvawfd>
- Красуля О.Н., Смирнова А.В., Богущ В.И. Кавитационная дезинтеграция жидких посолочных сред — новая стратегия стабилизации пигментных систем охлажденного мяса. *Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции*. Москва: ЭИПСиП. 2020; 267–272. <https://elibrary.ru/pvnihi>
- Безотосный С.С., Притыка И.А., Тишков В.Ф. Сорбционно-окислительно-кавитационная технология очистки жидких радиоактивных отходов. *Безопасность, эффективность, ресурс. Сборник тезисов докладов XIV Международной научно-практической конференции по атомной энергетике*. Севастополь: Севастопольский государственный университет. 2018; 16–18. <https://elibrary.ru/ywizsx>
- Таймаров М.А., Салтанаева Е.А., Ахметова Р.В. Совершенствование технологии сжигания высокообводненного мазута с помощью кавитационной обработки. *Результаты комплексных исследований в области высоких технологий. Сборник статей Международной научно-практической конференции*. Уфа: Аэтерна. 2019; 30–32. <https://elibrary.ru/mkqbvj>
- Бельх М.М. Исследование кавитационного процесса в технологии очистки загрязненных сред. *Молодежь и научно-технический прогресс. Сборник докладов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Губкин: Ассистент плюс. 2018; 3: 196–199. <https://elibrary.ru/pprivx>
- Гусев Б.В., Оленич Д.И., Джугарян И.Г. Свойства бетона с использованием поликарбоксилатных добавок при кавитационной обработке. *Инновации и инвестиции*. 2019; (3): 239–242. <https://elibrary.ru/rmqquo>
- Cvetković M., Kompare B., Klemenčič A.K. Application of hydrodynamic cavitation in ballast water treatment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015; 22(10): 7422–7438. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4360-7>
- Long X.-p. et al. Numerical analysis of bubble dynamics in the diffuser of a jet pump under variable ambient pressure. *Journal of Hydrodynamics*. 2017; 29(3): 510–519. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60763-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60763-1)
- Gogate P.R., Kabadi A.M. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*. 2009; 44(1): 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006>
- Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation — an alternative to ultrasonic food processing. *Technical Acoustics*. 2011; 9.
- Prokhasko L.S., Rebezov M.B., Zalilov R.V. Method for calculating the longitudinal dimensions of hydrodynamic cavitation devices with a pressure jump. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 613: 012113. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012113>
- Prokhasko L. et al. Mathematical model of a hydrodynamic cavitation device used for treatment of food materials. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(24): 9766–9771.
- Prokhasko L. et al. Development of the Mathematical Model of a Hydrodynamic Cavitations Device. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 8(1): 1113–1120. <https://elibrary.ru/qrazyh>

ОБ АВТОРАХ

Любовь Савельевна Прохаско,
кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики
и гидропневмосистем
prokhaskols@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет,
пр-т Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия

REFERENCES

- Novikova Yu.A., Kopytenkova O.I. Drinking water quality control. *Production quality control*. 2022; (5): 32–36 (In Russian). <https://elibrary.ru/layovd>
- Lovkis Z.V. Assessment of quality and safety indicators of drinking and process water. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*. 2023; 61(1): 78–86 (In Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-1-78-86>
- Kalacheva O.A. Laboratory control: analysis of drinking water and wastewater. *Natural and technical sciences*. 2022; (2): 282, 283 (In Russian). <https://elibrary.ru/sdzqdi>
- Mukhin A.N., Kiryushin M.S. Why clean water at industrial facilities so important for enterprises? *Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2018; (4): 8–12 (In Russian). <https://elibrary.ru/yvawfd>
- Krasulya O.N., Smirnova A.V., Bogush V.I. Cavitation disintegration of liquid salting media is a new strategy for stabilizing pigment systems of chilled meat. *Safety and quality of agricultural raw materials and food. Collection of articles of the All-Russian scientific and practical Conference*. Moscow: APCPublishing. 2020; 267–272 (In Russian). <https://elibrary.ru/pvnihi>
- Bezotosny S.S., Prityka I.A., Tishkov V.F. Sorption-oxidation-cavitation technology of liquid radioactive waste purification. *Safety, efficiency, resource. Collection of abstracts of the 14th International Scientific and Practical Conference on Atomic Energy*. Sevastopol: Sevastopol State University. 2018; 16–18 (In Russian). <https://elibrary.ru/ywizsx>
- Taimarov M.A., Saltanayeva E.A., Akhmetova R.V. Improving the technology of burning high-watered fuel oil using cavitation treatment. *Results of complex research in the field of high technologies. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*. Ufa: Aeterna. 2019; 30–32 (In Russian). <https://elibrary.ru/mkqbvj>
- Belykh M.M. Investigation of the cavitation process in the technology of purification of contaminated media. *Youth and scientific and technological progress. Collection of reports of the XI International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists*. Gubkin: Assistant plus. 2018; 3: 196–199 (In Russian). <https://elibrary.ru/pprivx>
- Gusev B.V., Olenich D.I., Dzhabagian I.G. Concrete properties using polycarboxylate additives during cavitation treatment. *Innovation & Investment*. 2019; (3): 239–242 (In Russian). <https://elibrary.ru/rmqquo>
- Cvetković M., Kompare B., Klemenčič A.K. Application of hydrodynamic cavitation in ballast water treatment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015; 22(10): 7422–7438. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4360-7>
- Long X.-p. et al. Numerical analysis of bubble dynamics in the diffuser of a jet pump under variable ambient pressure. *Journal of Hydrodynamics*. 2017; 29(3): 510–519. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60763-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60763-1)
- Gogate P.R., Kabadi A.M. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*. 2009; 44(1): 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006>
- Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation — an alternative to ultrasonic food processing. *Technical Acoustics*. 2011; 9.
- Prokhasko L.S., Rebezov M.B., Zalilov R.V. Method for calculating the longitudinal dimensions of hydrodynamic cavitation devices with a pressure jump. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 613: 012113. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012113>
- Prokhasko L. et al. Mathematical model of a hydrodynamic cavitation device used for treatment of food materials. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018; 13(24): 9766–9771.
- Prokhasko L. et al. Development of the Mathematical Model of a Hydrodynamic Cavitations Device. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019; 8(1): 1113–1120. <https://elibrary.ru/qrazyh>

ABOUT THE AUTHORS

Lubov Savelievna Prokhasko,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Hydraulics and Hydropneumodynamics
prokhaskols@susu.ru

South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia