

DOI: 10.17516/1999-494X-0363

УДК 628.33; 628.477.6

## Obtaining High-Selective Sorbents from Waste of the Metallurgical Industry Based on Cavitation Activation Of Sorption Centers

**Olga G. Dubrovskaya,  
Anastasia G. Bobrik, Vladimir A. Kulagin\*,  
Anatoly I. Matyushenko and Elman A. Eldarzade**  
*Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 10.10.2021, received in revised form 09.01.2022, accepted 08.02.2022

**Abstract.** The results of the physicochemical analysis of lining scrap of various locations are presented, in order to determine the modification and treatment of waste, and specifically – lining brick scrap. The chemical composition of this waste was determined by the XRD method. The following substances were identified that are suitable for the modification of the sorbent: oxides of aluminum, iron, silicon and titanium, in the optimal percentage, which made it possible, at low costs for mechanical grinding and activation, to obtain a functionally active sorbent with high technical and operational characteristics.

**Keywords:** sorption, sorbent, activation, cavitation, cavitation technologies, solid waste from metallurgy, recycling.

**Acknowledgements.** The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 18–41–242008.

Citation: Dubrovskaya, O. G., Bobrik, A. G., Kulagin, V. A., Matyushenko, A. I., Eldarzade, E. A. Obtaining high-selective sorbents from waste of the metallurgical industry based on cavitation activation of sorption centers. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(1), 35–44. DOI: 10.17516/1999-494X-0363

# Получение высокоселективных сорбентов из отходов металлургической промышленности на основе кавитационной активации сорбционных центров

О. Г. Дубровская, А. Г. Бобрик,  
В. А. Кулагин, А. И. Матюшенко, Э. А. Эльдарзаде  
*Сибирский федеральный университет  
Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Изложены результаты физико-химического анализа лома футеровок различного местообразования с целью определения модифицирования и обработки отхода, а конкретно – лома футеровочного кирпича. Установлен химический состав данного отхода методом РФА. Выявлены следующие вещества, подходящие для модификации сорбента: оксиды алюминия, железа, кремния и титана, в оптимальном процентном соотношении, что позволило при невысоких затратах на механическое измельчение и активацию получить функционально-активный сорбент с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками.

**Ключевые слова:** сорбция, сорбент, активация, кавитация, кавитационные технологии, твердые отходы металлургии, рециклинг.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18–41–242008.

Цитирование: Дубровская, О. Г. Получение высокоселективных сорбентов из отходов металлургической промышленности на основе кавитационной активации сорбционных центров / О. Г. Дубровская, А. Г. Бобрик, В. А. Кулагин, А. И. Матюшенко, Э. А. Эльдарзаде // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(1). С. 35–44. DOI: 10.17516/1999-494X-0363

## Введение

В современном мире важны проблемы, связанные с охраной окружающей среды от промышленных и иных выбросов, характерных для производственной деятельности человечества. Параллельно с этими проблемами возникают новые, обусловленные максимальной утилизацией отходов антропогенной деятельности [1–5]. Развитие существующих и поиск новых способов и средств обезвреживания промышленных и бытовых стоков являются категорическим императивом современных исследований в этой области знаний. Одним из эффективных методов очистки сточных вод служит применение различных сорбентов – сорбционные методы [6–15]. Достаточно успешными оказались методы очистки промышленных стоков от нефтепродуктов и тяжелых металлов, основанные на кавитационной технологии [16–19]. Применение эффектов кавитации положительным образом повлияло и на производство непосредственно самих сорбентов из различных материалов [20–23].

В этой связи появился целый ряд работ, направленных на физическое и математическое моделирование суперкавитационных течений, технологических процессов и оборудования, основанных на эффектах гидротермодинамической кавитации [24–33]. Однако данных для уверенного проектирования процессов сорбционной очистки стоков металлургических предприятий оказывается недостаточно.

Основной задачей, направленной на снижение экологического воздействия на природную окружающую среду предприятий металлургической промышленности, является утилизация и переработка всех видов отходов основного производства. При анализе исходных данных предприятия металлургического промышленного комплекса АО РУСАЛ-Красноярск были классифицированы 45 видов отходов, определены их классы опасности и оценены годовые массы, подлежащие хранению и утилизации. Так, определено, что в строительные материалы различного назначения и сорбенты для очистки промышленных сточных вод могут быть переработаны 14 видов отходов.

Отсюда цель данной работы – получение и изучение сорбционных свойств загрузочного материала из отхода футеровочного кирпича предприятия металлургической промышленности; модернизирование стандартной системы фильтрационного блока путем как внедрения новых конструктивных параметров фильтровальных установок, так и использования фильтрационных загрузок с высокими сорбционными показателями; обосновать с точки зрения экологичности и ресурсосбережения применение данного материала.

Учитывая достаточно большой объем твердых отходов металлургического производства, а конкретно отходов футеровки (футеровочного кирпича) – свыше 14 т/год, – целесообразным является разработка технологии рециклинга с возвратом вторичного продукта в другие сопутствующие технологические процессы на данном производстве. Одним из перспективных направлений в решении этого вопроса выступает получение высокоэффективных сорбентов и применение их в очистке производственных сточных вод. С экономической и экологической точки зрения целесообразно кондиционировать данные сточные воды для дальнейшего повторного применения и замкнутого цикла водопользования. В производственных процессах металлургических предприятий множество операций требует использования технической воды. Среди них:

- теплообмен в системах отопления, охлаждения жидких и твердых тел;
- промывка от твердых частиц на фильтрах очистки газов;
- поверхностная обработка теплосилового оборудования;
- поливомоечные операции и влажная обработка территории.

С учетом множества производственных процессов техническое качество воды для них требуется разное и, следовательно, в каждом конкретном случае для очистки сточных вод применяются разные технологические системы.

Для повышения степени очистки сточных вод от нефтепродуктов, поступаемых от обмывки теплосилового оборудования, необходимо модернизировать стандартную систему фильтрационного блока путем как внедрения новых конструктивных параметров фильтровальных установок, так и использования фильтрационных загрузок с высокими сорбционными показателями.

Широко применяемые двухслойные угольно-кварцевые фильтры на сегодняшний день не могут обеспечить требуемое качество очистки нефтесодержащего стока ни в соответствии с требованиями ГН.2015, ни с требованиями к технической воде. Помимо этого, данные фильтры весьма громоздки, сложны в эксплуатации и практически не подлежат экономически выгодной регенерации.

Стандартная схема очистки воды может быть оптимизирована следующими конструктивно-технологическими элементами: фильтрационным блоком с применением сменных кассет, с за-

грузкой экспериментально полученным сорбентом на основе модифицированного футеровочного кирпича.

**Материалы и методы.** При исследовании использовались стандартные методики оценки качества воды, методы анализа сорбционных свойств материалов, методы термографического анализа состава футеровочного кирпича, методы математического моделирования и интерпретации результатов исследования.

В качестве сорбента предлагается использовать экспериментально полученную загрузку на основе глинистой составляющей. Сырье для получения данного сорбента является отходом – лом футеровочного кирпича, состав которого определен методом РФА (рис. 1). Полученный гранулированный сорбент обладает высокоразвитой активной поверхностью, включающей микро- мезо- и макропоры, обеспечивающие высокую селективно-сорбционную способность к извлечению нефтепродуктов и тяжелых металлов из сточной воды. Сорбент, полученный лабораторным путем, был апробирован в исследовательской лаборатории Инженерно-строительного института СФУ (ИЛ СМиХАВ). Сорбент подвергался модификациям, таким как термокислотная обработка, щелочная обработка, кавитационная активация при 5000 об/мин в течение 90 с.

При различных типах активации определялись основные физико-химические параметры гранул сорбционного материала, а также исследовалась эффективность извлечения нефтепродуктов и ряда тяжелых металлов из сточной воды. Сорбент проявил стабильную активность к следующим металлам: Fe, Mn, Pb, Zn. В меньшей степени к следующим металлам: Cu, Ni. Сорбционные свойства данного материала значительно снижаются в кислых средах, при значении pH в диапазоне 8–9,5 сорбция протекает в зоне оптимума. Для анализа качественного и количественного состава загрязнителей в исходной сточной воде и в фильтрате использо-

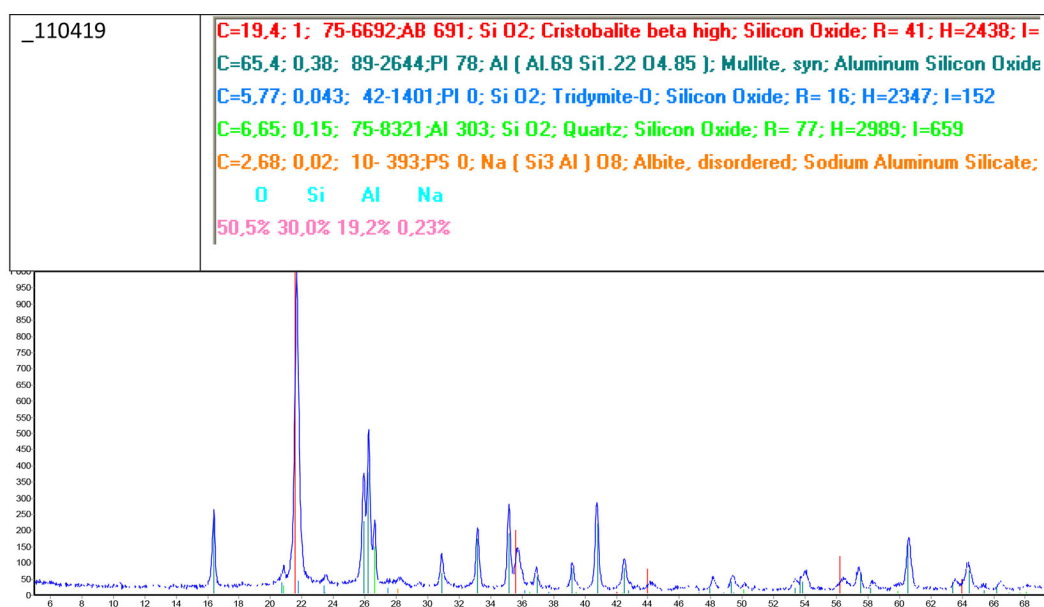


Рис. 1. Рентгенофлюоресцентный анализ сырья (отхода футеровочного кирпича)

Fig. 1. X-ray fluorescence analysis of raw materials (waste of lining bricks)

вались стандартные методы химического анализа, ИК-спектрометрия, атомно-эмиссионный спектральный анализ.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Полученный сорбент имеет высокую сорбционную емкость и степень извлечения нефтепродуктов и тяжелых металлов на 25 % выше, чем у аналога. При этом у полученного сорбента при микроскопировании обнаружен поверхностный алюмосодержащий слой, позволяющий ускорять процессы сорбции на основе электростатического притяжения поллютантов. Результаты предварительного исследования представлены в табл. 1. Наиболее эффективной оказалась модификация сорбента с кавитационной обработкой. Экспериментальные данные приведены на рис. 1. Сравнительный анализ эффективности сорбции представлен диаграммой на рис. 2.

Особого внимания заслуживают результаты исследования сорбционной способности активированного модифицированного сорбента при различных температурных режимах. Экспериментальные данные показали, что независимо от температуры подаваемой на очистку воды, эффективность сорбента, активированного гидротермодинамической кавитацией, остается неизменно высокой и составляет 86,7 % (табл. 2).

Таблица 1. Характеристика сорбента

Table 1. Characteristics of the sorbent

Показатель	Модифицированный сорбент термокислотной активации	Модифицированный сорбент кавитационной обработкой с режимом 5000 об/мин
Морфо-физические параметры	Гранулы свободной формы, размером 1,15–1,3 мм, цвет от серого до коричневого	Гранулы свободной формы, размером 0,03–0,3 мм, цвет от серого до коричневого
Сорбционная емкость (поглощающая способность) по меди, мг / г	17,52–25,6	15,79–26,7
Температура применения, °С	+4 ...+25	+4 ...+25
Степень извлечения тяжелых металлов,%	81,2	95,1
Cu	64	86,9
Fe	86,6	98,9
Pb	92,9	99,7
Максимальная доза сорбента, г/л	5–12,8	5–9,4
Доза выгружаемого сорбента, мг/л	0,7	0,68
Расчетная высота сорбционной загрузки в адсорбере, м	В зависимости от диаметра (D) сорбционного фильтра 0,80–1,50	В зависимости от диаметра (D) сорбционного фильтра 0,45–0,60 м

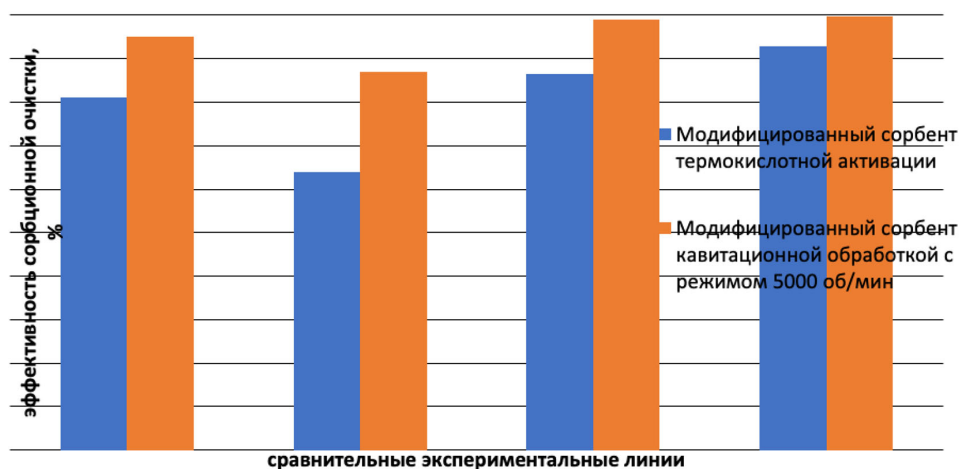


Рис. 2. Эффективность очистки промышленных сточных вод

Fig. 2. The efficiency of industrial wastewater treatment

Таблица 2. Эффективность очистки

Table 2. Cleaning efficiency

№ линия	Исходная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/дм <sup>3</sup>	Условия фильтрации	Конечная концентрация (сорбент, модифицированный кавитацией), мг/дм <sup>3</sup>	Эффект очистки (сорбент, модифицированный кавитацией), %
1	40	Нормальные условия (+20±2 °C)	1,37	96,57
2	40	Нагрев (+40±2 °C)	1,02	97,45
3	40	Охлаждение до +0,1 ... +0,4 °C	5,32	86,7

### Заключение

Получен сорбционный материал, исследованы оптимальные режимы активации сорбента, эффективность и селективность сорбции при различных температурах и pH.

Преимуществом выбора полученной и исследуемой сорбционной загрузки является ее высокая сорбционная емкость, эффективность извлечения нефтепродуктов и тяжелых металлов, простота конструкции и эксплуатации сорбционно-фильтровальной установки, максимальное использование объема фильтра, экономичность, что немаловажно, высокое качество очищенной воды. В качестве сорбционной загрузки рекомендовано использовать вид сорбента, активированного в кавитационной установке на основе гидротермодинамических эффектов. Данный вид активации позволяет развить на поверхности сорбента микро-, мезо- и макротрещины, что бесспорно приводит к увеличению площади развитой поверхности и, как следствие, к увеличению сорбционной емкости. В лабораторных испытаниях на опытной фильтрационной установке степень очистки нефтепродуктов составила 86,7 % (конечная концентрация нефтепродуктов – до 0,05 мг/л).

Данные технические решения позволяют достичь требуемого качества воды для повторного использования. Главные достоинства предлагаемых сорбционных материалов:

1. Рециклинг отхода угольной промышленности с задаваемыми вариативными параметрами сорбции (термоокислотная, щелочная обработка, кавитационная активация).

2. Различные типы активации глиежа позволяют задавать селективность сорбции с одномоментным увеличением сорбционной емкости. Так, при максимальной расчетной дозе сорбента степень извлечения нефтепродуктов составляет 95 %.

Введение блока сорбционных подобных фильтров для очистки промышленного стока и кондиционирования технической воды позволяет сформировать замкнутый оборотный цикл водопользования и значительно снизить эксплуатационные затраты предприятия. Результаты данного исследования могут быть применены в фильтрационных установках для очистки сточных вод предприятий различных отраслей с целью очистки сточной воды от нефтепродуктов и тяжелых металлов.

### Список литературы / References

[1] Дубровская О.Г., Приймак Л.В., Андруняк И.В. *Ресурсосберегающие технологии обезвреживания и утилизации отходов предприятий теплоэнергетического комплекса Красноярского края*: Монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. 164 с. [Dubrovskaya O.G., Priymak L.V., Andrunyak I.V. *Resource-saving technologies for neutralizing and utilizing waste from enterprises of the thermal power complex of the Krasnoyarsk Territory*: Monograph. Krasnoyarsk: Sib. feder. Univ., 2014. 164 p. (in Russian)].

[2] Дубровская О.Г., Евстигнеев В.В., Кулагин В.А. Кондиционирование сточных вод энергетических систем и комплексов. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2011. 4(6). 665–675 [Dubrovskaya O.G., Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Conditioning of wastewater from power systems and complexes, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2011. 4(6). 665–675 (in Russian)].

[3] Эльдарзаде Э.А. Использование очищенного промышленного и ливневого стока как альтернативного источника водопользования предприятия, *Строительство и Архитектура – формирование среды жизнедеятельности*. Ачинск, 2016. 122–123 [Eldarzade E.A. Use of purified industrial and storm water as an alternative source of water use of the enterprise, *Building and Architecture – Formation of the Environment of Vital Activity*. Achinsk, 2016. 122–123 (in Russian)].

[4] Эльдарзаде Э.А. Разработка замкнутых систем водоочистки предприятий нефтегазодобычи как основа экологической безопасности региона, *Современное состояние науки и техники*. Сочи, 2017. 73–79 [Eldarzade E.A. Development of closed water treatment systems for oil and gas production enterprises as a basis for environmental security in the region, *Current State of Science and Technology*. Sochi, 2017. 73–79 (in Russian)].

[5] Куликова Н.И., Ножевникова А.Н. *Очистка муниципальных сточных вод с повторным использованием воды и обработанных осадков: теория и практика*. М.: Логос, 2014. 400 с. [Kulikova N.I., Nozhevnikova A.N. *Purification of municipal wastewater with the reuse of water and treated sediments: theory and practice*. Moscow: Logos, 2014. 400 p. (in Russian)].

[6] Гимаева А.Р., Валинурова Э.Р., Игдавлетова Д.К., Кудашева Ф.Х. Сорбция ионов тяжелых металлов из воды активированными углеродными адсорбентами. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2011. 11(3). 350–356 [Gimaeva A.R., Valinurova E.R., Ihdavletova D.K., Kudashева F.K. Sorption of heavy metal ions from water by activated carbon adsorbents. *Sorption and Chromatographic Processes*. 2011. 11(3). 350–356]

Kudasheva F.H. Sorption of heavy metal ions from water by activated carbon adsorbents, *Sorption and chromatographic processes*. 2011. 11(3). 350–356 (in Russian)].

[7] Зыкова И.В., Лысенко И.В., Панов В.П. Адсорбция ионов меди керамической крошкой из бинарных и многокомпонентных растворов, *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2004. 47(9). 151–167 [Zykova I.V., Lysenko I.V., Panov V.P. Adsorption of copper ions by ceramic chips from binary and multicomponent solutions, *Proceedings of universities. Chemistry and Chemical Technology*. 47(9). 151–167 (in Russian)].

[8] Цветкова А.Д., Акаев О.П. Исследование процесса адсорбции ионов меди на модифицированном диоксиде кремния, *Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова*. 2011. 2. 27–30 [Tsvetkova A.D., Akayev O.P. Investigation of the process of adsorption of copper ions on modified silicon dioxide, *Bulletin of KSU named after. N.A. Nekrasov*. 2011. 2. 27–30 (in Russian)].

[9] Мухин В.М., Тарасов А.В., Клушин В.Н. *Активные угли России*, М.: Metallurgy. 2000. 352 с. [Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. *Active coals of Russia*, М.: Metallurgy, 2000. 352 p. (in Russian)].

[10] Тимофеев К.Л., Усольцев А.В., Краюхин С.А., Мальцев Г.И. Кинетика сорбции ионов индия, железа и цинка слабокислотными катионитами. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. 15(5). 720–729 [Timofeev K.L., Usoltsev A.V., Krayukhin S.A., Mal'tsev G.I. Kinetics of sorption of indium, iron, and zinc ions by weakly acidic cation exchangers, *Sorption and chromatographic processes*. 2015. 15(5). 720–729 (in Russian)].

[11] Wang Ji-Zhong, Sheng-Rong Li, Bao-Lin Liu, Jing-Gui Tong Waste from the sewage of heavy metals using natural minerals, *Bull Mineral Petrol Geochem*. 2005. 24(2). 159–164.

[12] Svilović S., Rušić D., Stipišić R. Modeling batch kinetics of copper ions sorption using synthetic zeolite NaX, *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. № 170. 941–947.

[13] Demirbas Ayhan. Heavy metal adsorption onto agrobased waste materials. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. 157(2-3). 220–229.

[14] Lokendra S. Thakur, Parmar Mukesh. Adsorption of heavy metal from synthetic waste water by tea waste adsorbent, *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2013. 2(6). 6–19.

[15] Tumin Najua D., A. Chuah Luqman, Z. Zawani, S. Abdul Rashid. Adsorption of copper from aqueous solution by Elais Guineensis kernel activated carbon, *Journal of Engineering Science and Technology*. 2008. 3(2). 180–189.

[16] Дубровская О.Г., Евстигнеев В.В., Кулагин В.А. Проблемы очистки сточных вод, содержащих эмульгированные нефтепродукты в оборотных системах замкнутых циклов водопользования, и пути их решения, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2013 6(6), 680–688 [Dubrovskaya O.G., Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Problems of wastewater treatment containing emulsified oil products in circulating systems of closed water use cycles, and ways to solve them, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2013 6(6), 680–688. (in Russian)].

[17] Дубровская О.Г., Кулагин В.А., Сапожникова Е.С. Современные компоновки технологических схем очистки сточных вод с использованием кавитационной технологии, *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2015. 8(2). 217–223 [Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Sapozhnikova E.S. Modern layouts of technological schemes for wastewater treatment using cavitation technology, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2015. 8(2), 217–223. (in Russian)].



[18] Евстигнеев В.В., Кулагин В.А. Кавитация в технологиях очистки сточных вод, *В мире научных открытий*, 2010, 5-1, 87–90 [Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Cavitation in wastewater treatment technologies, *In the world of scientific discoveries*, 2010, 5-1, 87–90 (in Russian)].

[19] Дубровская О.Г. *Технология гидротермодинамической обработки природных и сточных вод с использованием эффектов кавитации*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.14.04, 05.23.04, Сибирский федеральный университет; Красноярск, 2007. 22 с [Dubrovskaya O.G. *Technology of hydrothermodynamic treatment of natural and waste waters using the effects of cavitation*: Abstract dis. ... Cand. tech. Sciences: 01.14.04, 05.23.04, Siberian Federal University; Krasnoyarsk, 2007. 22 p. (in Russian)].

[20] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A. Intensification of the process sorption cleaning oily waste with the use hydrothermodynamic effects of cavitation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2016, 9(2), 268-279, DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-2-268-279.

[21] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A. Non-reagent cleaning of industrial wastewater, containing heavy metals based on technology of hydrothermodynamic cavitation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(4), 460-467. DOI: 10.17516/1999-494X-0153.

[22] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Limin Yao. The alternative method of conditioning industrial wastewater containing heavy metals based on the hydrothermodynamic cavitation technology, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2020, 13(8), 991–1001. DOI: 10.17516/1999-494X-0280

[23] Дубровская О.Г., Кулагин В.А., Сапожникова Е.С., Фэнг-Чэнь Ли, Цянь Ли, Чжи-Ин Чжэн. Математическое моделирование кавитационных процессов при кондиционировании промышленных сточных вод, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2015 8(3) 369–376 [Dubrovskaya OG, Kulagin VA, Sapozhnikova ES, Feng-Chen Li, Qian Li, Zhi-Ying Zheng Mathematical modeling of cavitation processes in the conditioning of industrial wastewater, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2015, 8 (3), 369–376 (in Russian)].

[24] Kulagin V.A., Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Markovich D.M., Shokin Yu.I. Physical and Mathematical Modeling in the Field of High-Velocity Hydrodynamics in the Experimental Base of the Krasnoyarsk Hydroelectric Plant Herald of the Russian Academy of Sciences, 2016, Vol. 86(6), 454–465. DOI: 10.1134/S1019331616060034

[25] Кулагин В.А., Вильченко А.П., Кулагина Т.А. *Моделирование двухфазных суперкавитационных потоков*: Монография; ред. В.И. Быков. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. 187 с. [Kulagin V.A., Vilchenko A.P., Kulagina T.A. *Modeling of two-phase supercavitation flows*: Monograph; ed. IN AND. Bykov. Krasnoyarsk: IPC KSTU, 2001.187 p. (in Russian)].

[26] Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И., Ли Ф.-Ч. *Тепломассообмен и суперкавитация*, Новосибирск: Наука, 2015, 436 с. ISBN 978–5–02–019206–5. [Demidenko N.D., Kulagin V.A., Shokin Yu.I., and Li F.-Ch. *Heat–Mass Exchange and Supercavitation* (Nauka, Novosibirsk, 2015) (in Russian)].

[27] Zheng Z Y, Qian Li, Feng-Chen Li, Vladimir A. Kulagin Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedged shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator, *Sci China Tech Sci*, 2015, 58: 1-12, doi: 10.1007/s11431-015-5827-y;

[28] Zheng Zhiying, Li Qian, Li Fengchen, Vladimir A. Kulagin, Numerical study on parameter selection for steam extraction of rotational supercavitating evaporator, *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2015.

[29] Likhachev D.S., Li F-C, Kulagin V.A. Experimental study on the performance of a rotational supercavitating evaporator for desalination, *Sci. China. Tech. Sci.*, 2014, 57: 2115–2130, doi: 10.1007/s11431-014-5631-0;

[30] Kulagin V.A., Pyanykh T.A. Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects, *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. 50. 24–29. DOI 10.1007/s10556-014-9848-3

[31] Витер В.К., Кулагин В.А. Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 243 с. [Viter V.K. and Kulagin V.A., *Large-Scale Gravitational Hydrodynamic Tunnels* (IPTs KGTU, Krasnoyarsk, 2006) (in Russian)].

[32] Demidenko N.D., Kulagin V.A., and Shokin Yu.I. Modeling and Calculating the Technology of Distributed Systems (Nauka, Novosibirsk, 2012) (in Russian).

[33] Ivchenko V.M., Kulagin V.A., and Nemchin A.F., *Cavitation Technology*, Ed. by G.V. Logvinovich (Izd. KGU, Krasnoyarsk, 1990) (in Russian).