

**Theoretical And Applied Heating Engineering**  
**Теоретическая и прикладная теплотехника**

DOI: 10.17516/1999-494X-0435

УДК 620.92

**Synthesis-Analysis of the Use  
of Cavitation Technologies**

**Aleksandr Yu. Radzyuk\***,  
**Elena B. Istyagina, Lyudmila V. Kulagina,**  
**Andrej V. Zhuikov and Denis A. Grishaev**  
*Siberian Federal University*  
*Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 05.10.2022, received in revised form 19.10.2022, accepted 15.11.2022

**Abstract.** An analysis of literature sources in the field of the use of cavitation technologies has shown that the effects of cavitation are used in a wide range of industrial technologies. This paper presents the main results of work on the cavitation treatment of various liquid compositions, multicomponent media in recent decades. The presented review allows us to conclude that the use of cavitation technologies in various fields of engineering and technology is relevant for solving important practical problems and, as a result, the need for their comprehensive study.

**Keywords:** cavitation, processing intensification, mixing devices, dispersion, emulsification, homogenization.

Citation: Radzyuk, A. Yu., Istyagina, E.B., Kulagina, L.V., Zhuikov, A.V., Grishaev, D. A. Synthesis-analysis of the use of cavitation technologies. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(7), 774–801. DOI: 10.17516/1999-494X-0435

**Синтез-анализ использования кавитационных технологий**

**А. Ю. Радзюк, Е. Б. Истягина,**  
**Л. В. Кулагина, А. В. Жуйков, Д. А. Гришаев**  
*Сибирский федеральный университет*  
*Российская Федерация, Красноярск*

**Аннотация.** Анализ литературных источников в области использования кавитационных технологий показал, что эффекты кавитации используются в широком спектре промышленных технологий. В данной работе приведены основные результаты работ по кавитационной

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: aradzyuk@sfu-kras.ru

обработке различных жидких композиций, многокомпонентных сред в последние десятилетия. Представленный обзор позволяет сделать вывод об актуальности использования кавитационных технологий в различных областях техники и технологии для решения важных практических задач и, как следствие, необходимости их всестороннего изучения.

**Ключевые слова:** кавитация, интенсификация обработки, смесительные устройства, диспергирование, эмульгирование, гомогенизация.

Цитирование: Радзюк А. Ю. Синтез-анализ использования кавитационных технологий / А. Ю. Радзюк, Е. Б. Истягина, Л. В. Кулагина, А. В. Жуйков, Д. А. Гришаев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(7). С. 774–801. DOI: 10.17516/1999-494X-0435

Одним из эффективных методов интенсификации многих химико-технологических процессов в жидкостях является кавитационное воздействие на обрабатываемую среду. В основе кавитационной технологии лежит явление кавитации, которая искусственно создается в специальных технологических суперкавитационных реакторах (СК-реакторах, СК-аппаратах, СК-насосах и т.п.). Принцип действия СК-аппаратов основывается на снижении давления в потоке жидкости до давления насыщенного пара за счет помещения в устройство кавитатора той или иной конструкции (например, решетка, конус и др.), обеспечивающего локальное увеличение скорости и, как следствие, падение давления. Образующиеся в потоке парогазовые пузырьки, как правило, объединяются в ансамбли и образуют некое «облако» – пространство, заполненное кавитационно-активными пузырьками. Соотношение содержания газа и пара в таких пузырьках может быть различным (теоретически от нуля до единицы). В зависимости от концентрации пара или газа в полости их называют паровыми или газовыми. При схлопывании кавитационных пузырьков (каверн) выделяющейся в этом процессе энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной каверны [1–6].

В последние годы процесс кавитационного воздействия стал широко использоваться для интенсификации многих промышленных производств. Только за последние годы в отечественной и зарубежной литературе можно встретить большое число научных публикаций, посвященных применению кавитационных технологий в различных областях промышленности. Основы кавитационной технологии в Советском Союзе, а затем в России заложены, обобщены и развиты в работах В. М. Ивченко, В. А. Кулагина, А. Ф. Немчина и др. [1–6], а затем и их учеников [7–18].

В химической промышленности кавитационные реакторы при производстве биодизеля обеспечивают более высокую скорость реакции по сравнению с обычными реакторами, поскольку значительно сокращается время, необходимое для смешивания и диффузии молекул реагентов, и, следовательно, устраняется потребность в высокой энергии для перемешивания [19]. Микропузырьки воздуха, полученные методом гидравлической кавитации с использованием сопла Вентури, рассматриваются в качестве топливной присадки в двигателях внутреннего сгорания [20]. Преимуществом их использования является простота производства и низкая стоимость.

Смесительные устройства и системы на их основе часто используются во многих отраслях промышленности для таких технологических операций, как смешивание, диспергирование, процессы тепло- и массообмена. Основным направлением совершенствования таких устройств

является повышение степени диспергирования эмульсий и суспензий. Одним из наиболее перспективных способов улучшения условий работы смесителей и повышения степени диспергирования смеси является использование гидродинамической кавитации. В работе [21] рассматривалась теория кавитационных явлений высокоскоростных струй и разработка эффективного гидродинамического смесителя с минимальным энергопотреблением.

Производство биодизеля из микроводорослей является одним из решений энергетической проблемы будущего [22]. Одним из механических методов разрушения клеток с наименьшими затратами энергии является гидродинамическая кавитация. В данной работе сравнивается эффективность липидной экстракции микроводорослей с помощью гидродинамической кавитации и обычной экстракцией. Результаты показали значительное преимущество гидродинамической кавитационной технологии по сравнению с традиционной.

Широко используются кавитационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности [23–27]. Так, в работе [28] исследуется влияние древесного угля после кавитации на химические и биохимические свойства почвы. Результаты показали значительное снижение содержания тяжелых металлов в биомассе при использовании древесного угля после кавитационной обработки. Установлено, что за счет эффектов паро- конденсационной кавитации происходят структурные превращения макромолекулярных соединений диффузионного сока и коллоидных дисперсионных веществ, что приводит к увеличению электропроводности жидкости за счет дезагрегации веществ коллоидной дисперсии и высвобождения компонентов ионных носителей [29]. Этот эффект используется в свеклольно-обрабатывающей промышленности для повышения чистоты конечного продукта и увеличения объема производства. В работе [30] представлен механизм оптимизации результатов исследований комплексной системы переработки отходов свекловичного производства сахара с использованием кавитационных гидродинамических генераторов. В результате исследований подтвержден синергетический эффект при использовании кавитатора совместно с другими методами воздействия. Процессы экстракции посредством гидродинамической кавитации отработанной кожуры лимона в воде на предприятиях по переработке лимонного сока рассматриваются в работе [31]. Возможность использования замкнутого цикла, примененного к переработке цитрусовых, позволяет повысить производство пектина и эфирного масла лимона и водорастворимого красителя.

Получение наноэмульсий эмульгированием жидкости за счет комбинированного воздействия кавитации, сдвига и удара демонстрирует превосходную эффективность эмульгирования при использовании порошка молочной сыворотки для получения стабильных фракций [32]. Роторный кавитатор для обработки суспензий с разрушением клеток микроорганизмов и эмульгированием несмешивающихся смесей представлен в работе [33].

Необходимость разработки и применения эффективных технологий очистки и современного энергосберегающего оборудования, реализующего их, является актуальной задачей для многих нефтегазодобывающих и сервисных организаций. Для этих целей могут быть применены различные установки для гидродинамической кавитационной очистки [34]. Проблемы использования гидродинамической кавитации в нефтегазовой отрасли развиваются в работе [35]. Кавитация интенсифицирует процессы диспергирования, эмульгирования, гомогенизации, очистки отложений и т.д. Авторы обобщили свой опыт разработки научно обоснованных теоретических и технологических решений в проектировании оборудования и технологий

использования кавитационно-струйного течения для решения задач нефтегазовой отрасли, предложив многокомпонентные дисперсные среды (буровые и цементные растворы) с использованием кавитации. В статье [36] исследуется технология гидродинамической кавитационной обработки вязкой и высоковязкой нефти и возможность ее применения в трубопроводной транспортной системе с целью повышения реологических свойств транспортируемой нефти, в том числе динамических вязкостных напряжений сдвига. Использование ультразвуковой кавитации для снижения вязкости тяжелой нефти приведено в работе [37]. В работе [38] показано, что волновая обработка бурового раствора проточными гидродинамическими вихревыми генераторами значительно повышает качество бурового раствора и сокращает время его приготовления. Генерация нанопузырьков за счет гидродинамической кавитации используется для получения большого объема стабилизированных нанопузырьков для практической флотации путем непрерывной рециркуляции потока через резервуар для насыщения газа или кавитационную трубку при аэрации нефтеносных суспензий в гидротранспортных трубопроводах в работе [39].

Комплексное воздействие на гомогенные и гетерогенные жидкости, которые могут быть использованы в технологических целях, привлекло внимание исследователей в различных науках. Кавитационное воздействие на нефть является одним из эффективных методов, интенсифицирующих химико-технологические, гидромеханические и массообменные процессы и разрушение веществ. В работе [40] подробно рассматриваются и анализируются механизмы воздействия и применения кавитации в различных процессах в нефтяной промышленности, в том числе процессы нефтепереработки, которые связаны с сырой нефтью и нефтяными отходами, такие как снижение вязкости, деэмульгирование, десульфурация и улучшение качества тяжелой нефти и продукты нефтепереработки, в том числе нефтешламы и отработанные маслосодержащие воды. Различным аспектам, связанным с нефтепереработкой и сжиганием смесей, содержащих нефтепродукты, посвящены работы [41–44].

Разработке новых методов производства композиционных материалов с использованием гидродинамической кавитации посвящены статьи [17, 45–52]. В работе [53] авторы исследуют возможность получения композиционного материала на основе эластичного пенополиуретана с углеродными наполнителями с использованием пропитки полиуретаном в неравновесной суспензии сажи. Неравновесную суспензию получали обработкой в гидродинамическом генераторе роторного типа в режиме кавитации.

Кавитационный механизм абляции материала, который обычно имеет место при импульсном лазерном воздействии на твердую мишень в жидкой среде, сказывается на формировании популяции наночастиц металла [53]. Метод получения наночастиц коллоидных сплавов путем импульсной лазерной абляции в жидкостях рассматривается в работе [54]. Расслоение абляционного факела в формирующемся кавитационном пузыре приводит к образованию наночастиц разного размера и состава. В данной работе используются расчетно-экспериментальные исследования механизмов формирования наночастиц в ультракороткой импульсно-лазерной абляции тонких двухслойных пленок Ag/Cu и Cu/Ag.

В работе [55] рассмотрен механизм совместного влияния магнитного поля и гидродинамической кавитации на свойства солевых растворов, используемых для смешивания цементных паст. Гидродинамическая кавитация приводит к образованию активных форм кислорода, нанопузырьков диоксида углерода и инициирует взаимодействие новых форм

с примесными катионами металлов, растворенными в воде. Получаемый цементный камень отличается повышенной прочностью и морозостойкостью по сравнению с камнем, полученным традиционным способом. Влияние кавитационной обработки на реологические свойства щелочно-алюмосиликатного связующего для вспучивающихся покрытий с целью улучшения теплотехнических и механических свойств рассмотрено в работе [56]. Определены временные и физические параметры, при которых ускоряются процессы наноструктурирования. В стройиндустрии увеличение удельной поверхности цемента непосредственно в водной среде с помощью кавитационного диспергирования позволяет полнее использовать его потенциальные свойства и повышать степень гидратации и поверхностную энергию частиц. Разрушая малопрочную первичную алюминатную крупнозернистую структуру, удается получить мелкокристаллическую структуру цементного камня, прочность которого возрастает в 2–3 раза по сравнению с приготовлением раствора в обычных смесителях [1, 7, 27]. Влиянию кавитационно-активированной воды на характеристики цементного компаунда при захоронении радиоактивных отходов посвящены исследования [57–60].

Гидродинамическая обработка может способствовать улучшению технологических свойств древесины. Изменение её физико-механических свойств при изготовлении древесных плит из опилок рассматривается в работе [61]. Вопросу повышения качества готового продукта из древесной массы, предварительно обработанной в гидродинамическом диспергаторе, посвящена статья [62]. Вследствие повышения водоудерживающей способности досок, изготовленных из такой массы, их прочность увеличивается.

Целый ряд работ научной школы кавитационной технологии СФУ представлен в области топливоподготовки в виде водотопливных смесей с изучением различных аспектов этой проблемы [11–14, 63–75]. На энергетических предприятиях создание высокодисперсных водомазутных эмульсий на основе кавитационной обработки является весьма перспективным [76, 77]. В данных работах рассмотрены конструкции оборудования для кавитационной обработки вязких жидкостей на стадии хранения и подготовки к сжиганию на котельных и ТЭЦ. Предпочтение отдается аппаратам статического типа, отличающимся высокой производительностью, надежностью и низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

В работе [78] исследовано влияние предварительного окисления вакуумного остатка для снижения содержания серы в коксе с помощью технологии гидродинамической кавитации. Среди новых угольных технологий большой интерес представляет сжигание низкосортного угля в виде водоугольного шламового топлива. В статье [79] представлены результаты влияния предварительной кавитационной обработки воды в составе водоугольного топлива на динамику сгорания топлива и на его экологические характеристики. В режиме суперкавитации использовался гидродинамический осциллятор роторного типа. Показано, что технология кавитационной обработки воды приводит к изменению динамики горения водоугольного топлива и дополнительному снижению содержания  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  В статье [77] рассматривается кавитационная обработка водоугольных шламов, увеличивающая степень дисперсности угля, следовательно, и его более эффективное сжигание.

В [68] представлены результаты разработки технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики. Лабораторные исследования, испытания в опытно-промышленных условиях показали возможность получения такого

топлива с требуемыми структурно-реологическими и теплотехническими характеристиками. Разработана пластифицирующая добавка, позволяющая достичь значений вязкости менее 500 мПа·с при содержании твердой фазы 53 % и низшей теплоте сгорания не менее 10,5 МДж/кг (2500 ккал/кг).

В [78] отмечается, что в качестве сырья для теплотехники широко используется уголь. Ряд недостатков угля, таких как воспламеняемость, не могут быть легко устранены. Использование водоугольного топлива на водошламовой основе вместо угля устраняет эту проблему. Водоугольное топливо (ВУТ) относится к жидкому топливу, а это означает, что основным направлением исследований является изучение его седиментационных и реологических свойств, обеспечивающих транспорт и распыление в котле, и теплофизических свойств, определяющих целесообразность и эффективность его использования. В работе показано, что конечные эксплуатационные свойства угольного суспензионного топлива могут быть определены на стадии приготовления ВУТ путем гидродинамической обработки водно-угольного шлама. В работе исследованы реологические и седиментационные свойства и параметры горения водоугольного топлива, время воспламенения капли, полнота ее сгорания, количество техногенных выбросов. Исследования проводились на углях Канско-Ачинского угольного бассейна (Россия) в лабораторных условиях с гидродинамической роторной мешалкой, позволяющей добиться кавитационных эффектов в обрабатываемой среде. Рассмотрены два типа ВУТ: первый изготавливался путем кавитационного диспергирования твердой угольной фракции в дистиллированной воде, а второй – по аналогии, но в качестве дисперсионной среды использовалась вода, предварительно обработанная кавитацией. В работе показано, что кавитационный способ получения ВУТ улучшает реологические и седиментационные свойства целевого топлива, снижает вредные выбросы при горении, влияет на параметры горения.

Представленные результаты разработки конструкций теплогенераторов малой и средней мощности [81] указывают на то, что вихревые адиабатические камеры сжигания различаются по расположению оси вихревого движения газов в топочном пространстве (горизонтально и вертикально). В зависимости от теплопроизводительности котла вихревая камера либо располагается рядом с котлом (котел является котлом-утилизатором), либо встраивается в топочное пространство котла. Адиабатические вихревые топочные камеры с горизонтальной осью вращения топочных газов были разработаны для котлов с теплопроизводительностью от 0,1 до 0,7 МВт. Экспериментальные исследования, испытания в опытно-промышленных и промышленных условиях теплогенераторов, работающих на ВУТ, показали их высокую техническую эффективность (механический недожог составил не более 5 %, КПД котлов – 86 %), а количество вредных выбросов в уходящих газах существенно меньше предельно допустимых значений (в 2–3 раза).

Всё чаще в последнее время встречается информация об использовании экологически чистого биотоплива [82–85]. Повышение эффективности его применения является актуальной задачей. В работе [82] авторы предлагают использовать в качестве предварительной обработки кавитационные процессы при производстве биотоплива. Изначально измельчаются сушеные листья и стебли кукурузы с раствором перкарбоната натрия. Эта смесь проходит через гидродинамическую кавитационную систему с системой кругового потока и трубкой Вентури. Образующиеся в процессе кавитации пузырьки схлопываются, разрушая волокна целлюлозы.

Целый ряд исследований проведен в СФУ в области обращения с радиоактивными отходами – отходами от переработки отработавшего ядерного топлива [7, 8, 86–97].

Очистка сточных вод от фенола с помощью технологии гидравлической кавитации рассматривается в работе [98]. В качестве кавитационного устройства использовалась комбинация трубки Вентури и различных диафрагм. Было изучено влияние времени работы, давления на входе, расположения отверстий и числа кавитации на скорость разложения фенола. В статье [99] представлены результаты исследований по химической очистке стоков от производства битумов нефтяного происхождения. Было изучено несколько процессов усовершенствованного окисления, включая использование гидроксильных и сульфатных радикалов-окислителей, гидродинамическую и ультразвуковую кавитацию. Результаты показали эффективное разложение большинства летучих органических соединений, присутствующих в сточных водах, при использовании этих технологий.

На основе лабораторных исследований и пилотных экспериментов в статье [100] была разработана промышленная система очистки воды, сочетающая озонирование с гидродинамической кавитацией для удаления водорослей, которая может применяться для уменьшения экологического ущерба и экономических потерь, которые могут быть вызваны цветением водорослей и мертвыми водорослями. Описание процесса гидродинамической кавитации, используемого для улучшения флотации минералов и обеззараживания воды, приводится в работе [20], где в качестве гидродинамического кавитационного устройства использовалась трубка Вентури. В работе [101] рассмотрена эффективность системы очистки балластных вод на основе усовершенствованных окислительных процессов сильного разряда электрического поля при атмосферном давлении и технология гидродинамической кавитации. Оценка эффективности озонирования и гидродинамической кавитации при очистке сточных вод является целью исследования в работе [102]. Очистке стоков промышленных производств химической, нефтегазовой, металлургической, радиотехнической и др. отраслей промышленности посвящены работы [15, 16, 103–114].

Обессоливание промышленных стоков и опреснение морских вод рассматривается как один из наиболее перспективных путей решения проблем водообеспечения. В этом направлении перспективно использование режимов развитой кавитации, поскольку особенности конструктивного исполнения и принципа действия термокавитационных аппаратов обуславливают некоторые преимущества этого способа обессоливания по сравнению с известными [10, 18, 115–122]. Следовательно, проведение исследований по созданию новых суперкавитационных аппаратов с целью интенсификации процессов обессоливания жидкостей является частью общей актуальной задачи водообеспечения промышленности и создания замкнутых систем водоснабжения [123]. За последние годы появился ряд публикаций технологических решений, направленных на экономию затрат на ресурсы, повышение производительности и увеличение срока службы опреснительных установок, экологичность их работы.

Ротационный суперкавитационный испаритель был предложен как новая технология для опреснения морской воды [124, 125]. На базе численного моделирования суперкавитационных потоков в испарителе проводится анализ эффективности работы СК-аппарата при различных температурах и скоростях вращения. Исследование влияния на пространственно-временную эволюцию вращательной естественной кавитации, гидроди-

намические характеристики кавитирующих потоков в ротационном испарителе при различных скоростях вращения с помощью экспериментов по визуализации и трехмерного стационарного численного моделирования было продолжено в работе [126]. Метод термического опреснения морской воды на основе суперкавитации предлагается в работе [127]. Проводится изучение влияния отбора пара на гидродинамические характеристики и производительность опреснения, а также определение диапазонов и давления экстракции, подходящих для работы испарителя на основе трехмерного численного моделирования суперкавитационных потоков при различных скоростях вращения и давлениях экстракции.

Надежности работы технологического оборудования повсеместно уделяется большое внимание. Экспериментально-расчетное изучение нестационарного потока в насосе водометных двигателей с целью предотвращения явления вращающегося срыва и кавитации и улучшения их конструкции и комплексных характеристик приводится в работе [128]. Исследования кавитационной эрозии сталей, работающих при высоких гидродинамических нагрузках, приведены в работе [129]. Показано, что азотирование поверхности стали приводит к повышению сопротивления эрозии. Влияние кавитации на работу гидростатического привода анализировалось в [130]. Эффект кавитации учитывается в численных полуаналитических исследованиях работы [131] с целью определения характеристик смазки текстурированного подшипника скольжения. Изучение влияния кавитационной модели для устойчивости работы подшипника скольжения приводится в работе [132]. Модель газовой кавитации используется для изучения влияния на напряжение сдвига и механические потери подшипника в работе [133]. Анализу проточного химического процесса и его засорения при непрерывной химической обработке посвящена работа [134]. Выявлено, что осаждение твердых частиц вызывается гидродинамической кавитацией. Характеристики вращающейся кавитации, которая может вызвать сильную вибрацию, поломку насоса и потерю работы в турбонасосах, численно рассчитываются в работе [135]. В данной статье представлена модель, основанная на исходных параметрах, для оценки устойчивости турбонасосов ракетных двигателей в невязких однофазных средах. В монографии [136] приводится обзор и анализ основных результатов исследований по истечению струйных потоков из сопел различных конструкций в условиях суперкавитации применительно к использованию данного явления в современных вибротехнологиях промышленного производства.

Широкое применение кавитационных разработок сопровождается их аналитическим и экспериментальным изучением [9, 117, 127, 137–166]. Для повышения надежности работы технологического оборудования в ряде работ проводятся исследования гидравлических характеристик на основе моделирования процессов кавитации в зависимости от таких параметров, как числа кавитации [62], где выявлен диапазон безопасной работы в условиях отсутствия кавитации гидродинамических турбин. Изучение развития (эволюции) кавитации численно проводилось в работе [167] для двумерного подводного крыла NASA, используя модель кавитации с переносом массы и модель  $k$ -эпсилон. Результаты теоретических исследований процесса гидродинамического измельчения суспензии целлюлозы на основе кавитационных потоков приведены в работе [168], где используется комплексная модель возникновения кавитационного эффекта, основанная на методах математического моделирования.

Использование математических моделей позволяет разработать наиболее оптимальную конструкцию без изготовления прототипов [169]. Моделирование процессов в термочувстви-

тельном кавитирующем потоке, возникающем вокруг судна на подводных крыльях, предложено в работах [170, 171]. В работе [172] численными методами выявлены основные закономерности истечения погружных и непогружных струй на разрушение отложений с высоким сцеплением с поверхностью нефтегазопромыслового оборудования. Численное моделирование течения многофазных потоков выполнялось в программном комплексе для решения задач вычислительной гидродинамики методом конечных элементов. Проведен ряд математических экспериментов: моделирование течений, а также сравнение течений для трех типов сопел: конического сужения с цилиндрическим выходным отверстием; цилиндрические и конические расходящиеся. Полученные результаты подтверждены практическими испытаниями в полевых условиях. Численному моделированию кавитационного потока посвящены и работы [173–175]. В работе [176] исследуется эффект кавитации в сопле с прямым конусом. Численное моделирование с учетом внутреннего и внешнего полей потока сопла проводилось в режиме объема жидкости с помощью пакета CFD.

Экспериментальные методы являются наиболее очевидными и надежными в исследованиях кавитации. На кавитационные процессы оказывает влияние большое число различных факторов. Количество пузырьков нерастворимого кислорода в движущемся потоке исследовалось в работе [154], где описан экспериментальный стенд с ресорбером для уменьшения количества растворенных газов. Проведено сравнение экспериментальных результатов формирования кавитационных условий до и после установки ресорбера. Опыты проводились с технической водопроводной водой, достоверность результатов подтверждена сравнением их с литературными данными. Развитие кавитации при запуске вверх подводных объектов, приближающихся с большой скоростью к поверхности моря, рассматривается в работе [177]. С помощью моделирования больших вихрей исследуется кавитационный отрыв и схлопывание во время выхода из воды осесимметричного снаряда.

Испытания на эрозию чистого алюминия в зависимости от геометрии сопла рассматривается в работе [178]. С помощью высокоскоростной видеокамеры проведены измерения напорного давления кавитирующей струи, чтобы понять влияние геометрии форсунки на интенсивность агрессивного воздействия. В работе [179] экспериментально исследуется взаимосвязь между условиями работы, геометрией сопла, диаметром сопла и поведением кавитационной струи с целью определения скорости эрозии в различных условиях. На основе математического анализа полученных результатов предложена новая форма расчета числа кавитации. В статье [180] изучается термодинамический эффект с помощью кавитации в трубке Вентури с использованием воды при температурах до относительно высоких уровней и при контролируемом содержании растворенного газа в резервуаре подачи. Характеристики кавитации (средняя длина прикрепленного облака полости) анализируются на основе экспериментов, проведенных с холодной и горячей водой. В работе [181] представлены экспериментальные результаты исследования влияния нелинейных волновых и кавитационных процессов, протекающих в рабочих элементах потока в гидродинамических вихревых и плоских генераторах с проточными телами различной формы, на реологические свойства буровых растворов. Лабораторные исследования подтверждены промышленными экспериментами, позволившими значительно повысить эффективность бурения. Экспериментальные исследования механизма образования и развития кавитации в соплах рассмотрены и описаны в работе [182].

Обобщены различные эмпирические формулы, связывающие коэффициент расхода с гидродинамическими параметрами. Особенности работы колебательно-резонансных кавитаторов по сравнению с гидродинамическими кавитаторами исследуются в работе [183]. Выяснено, что повышение напряженности кавитационного поля, а, следовательно, и увеличение производительности кавитационной обработки жидкости обеспечивают именно колебательно-резонансные кавитаторы. Лабораторный стенд для исследования реологических свойств вязких и высоковязкой нефти при их гидродинамической кавитационной обработке приводится в работе [36], здесь же представлены результаты моделирования и лабораторных исследований. Влияние физических параметров на характеристики образовавшихся субмикронных пузырьков, созданных путем смешивания воды и газа методом гидродинамической кавитации, было рассмотрено в работе [184]. Было показано, что скорость образования пузырьков и их плотность в воде напрямую зависят от давления газа. В статье [158] описан подход к определению режима течения с использованием экспериментального гидродинамического стенда для исследования кавитационных процессов. Эксперименты с технической водопроводной водой подтвердили достоверность полученных натуральных результатов с теоретическими значениями. Исследована зависимость гидродинамических режимов от средней скорости потока, числа Рейнольдса и числа кавитации. Математическое моделирование движения жидкостей, сопровождающегося явлением суперкавитации, рассматривается в статьях [156–158, 185], где представлен общий подход к математическому моделированию. Предложенная математическая модель учитывает геометрию, начальные параметры и физические константы, характеризующие процесс.

Важность крупномасштабных гидравлических исследований была также подчеркнута на заседании секции «Гидроэлектростанции и гидротехнические сооружения» Научно-технического совета Единой энергетической системы по расследованию причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС [186].

Общим вопросам, относящимся к данной проблематике, посвящены также работы [187–200].

Представленный обзор позволяет сделать вывод об актуальности использования кавитационных технологий в различных областях науки и техники для решения важных практических задач и, как следствие, необходимости их всестороннего изучения. К научным направлениям, развиваемым в настоящее время, направленным на экономию энергоресурсов, повышение надежности эксплуатации оборудования и снижение вредного воздействия на окружающую среду объектов энергетики и промышленных предприятий, относятся:

- развитие лабораторной базы исследований технологических эффектов кавитации и совершенствование техники эксперимента;
- исследования в направлении снижения радиационной опасности при обращении с радиоактивными и особо опасными токсичными отходами;
- технологии кондиционирования и обеззараживания технологической и сточных вод в энергетике, водоснабжении и канализации;
- теоретические и экспериментальные исследования многофазных суперкавитационных течений; расширение приложений кавитационной технологии в различных отраслях производства;

- анализ эффективности использования всех видов энергоресурсов на этапах получения, транспортирования, хранения, потребления тепловой и электрической энергии и утилизации с целью разработки новых энергоресурсосберегающих технологий в энергетике и теплотехнологии;
- оптимизация тепловых, электрических и водопроводных сетей, систем кондиционирования жилых и промышленных зданий с целью повышения энергоэффективности их работы, снижения аварийности;
- способы получения многофазных гетерогенных композиций для использования в биотехнологии и теплотехнологических установках, техносферной безопасности, стройиндустрии, медицине, микробиологии, сельском хозяйстве и др.;
- исследования в области создания новых композиционных и смазочных материалов, разработки по созданию новых видов эмульгированных (суспензионных) топливных смесей и др.;
- работы по обеспечению долговечности и надежности магистральных трубопроводов высокого давления и др.

### Список литературы/References

- [1] Ivchenko V.M., Kulagin V.A. and Nemchin A.F. *Cavitation Technology*, Ed. by acad. G.V. Logvinovich [M], Izd. KGU, Krasnoyarsk (1990). 200 (in Rus.).
- [2] Demidenko N.D., Kulagin V. A., and Shokin Yu.I., *Modeling and Calculating the Technology of Distributed Systems* [M], (Nauka, Novosibirsk 2012) (in Rus.).
- [3] Demidenko N.D., Kulagin V.A., Shokin Yu.I. and F. Ch. Li, *Heat–Mass Exchange and Supercavitation* [M], (Nauka, Novosibirsk, 2015) (in Rus.).
- [4] Кулагин В.А., Кулагина Л.В. *Основы кавитационной обработки многокомпонентных сред* [M]. М.: Русайнс, 2017. 230 с. ISBN 978–5–4365–1858–9 [Kulagin V.A., Kulagina L. V. *Fundamentals of cavitation treatment of multicomponent media* [M]. М.: Rusajns, 2017. 230 ISBN 978–5–4365–1858–9 (in Rus.)].
- [5] Kulagin V.A., Kulagina L. V., Li F.-C. *Fundamentals of Cavitation Treatment for Multi-component Environments* [M], М.: Ru-science, 2017. 182 ISBN 978–5–4365–1862–6.
- [6] Кулагина Л.В., Кулагин В.А. Повышение энергоэффективности различных технологий на базе гидродинамических эффектов кавитации [J] *Энергоэффективность: Достижения и перспективы: Материалы V Всеросс. НПК*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 239–247 [Kulagina L. V., Kulagin V. A. Improving the energy efficiency of various technologies based on the hydrodynamic effects of cavitation [J] *Energy Efficiency: Achievements and Prospects: Proceedings of the V All-Russian NPK*. Krasnoyarsk: IPTs KSTU, 2004. 239–247 (in Rus.)].
- [7] Попков В. А. *Развитие технологий обращения с отработавшим ядерным топливом* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск: СФУ, 2016. 143 с. [Popkov V. A. *Development of spent nuclear fuel handling technologies* [D]. Diss. ... cand. tech. Sciences. Krasnoyarsk: SFU, 2016. 143 (in Rus.)].
- [8] Козин О. А. *Методы и средства повышения экологической безопасности обращения с отходами ядерно-энергетического цикла* [D]: Дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск: СФУ, 2011. 114 с. [Kozin O. A. *Methods and means of improving the environmental safety of nuclear waste management* [D]: Diss. ... cand. tech. Sciences. Krasnoyarsk: SFU, 2011. 114 (in Rus.)].

[9] Кулак А.П. *Гидродинамические исследования развитой кавитации в ограниченных потоках* [D]. Дис. ... канд. техн. наук, Л., ВНИИГ, 1979. 230 с. [Kulak A.P. *Hydrodynamic studies of developed cavitation in limited flows* [D]. Dis. ... cand. tech. Sciences, L., VNIIG, 1979. 230 (in Rus.)].

[10] Криволицкий А.С. *Повышение эффективности работы тепловых сетей за счет кавитационной обработки воды* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2007. 206 с. [Krivolitskiy A. S. *Improving the efficiency of heat networks due to cavitation water treatment* [D]. Diss. ... cand. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2007. 206 (in Rus.)].

[11] Баранова М.П. *Технология получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма* [D]. Дисс. ... д-ра. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2014. 255 с. [Baranova M.P. *Technology for obtaining and using fuel water-coal suspensions from coals of various degrees of metamorphism* [D]. Diss. ... dr. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2014. 255 (in Rus.)].

[12] Радзюк А.Ю. *Методы и средства подготовки водоугольной суспензии для тепло-технологических* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: КГТУ, 2005. 128 с. [Radzyuk A. Yu. *Methods and means of preparing water-coal suspension for heat engineering* [D]. Diss. ... cand. tech. Sciences, Krasnoyarsk: KSTU, 2005. 128 (in Rus.)].

[13] Баранова М.П. *Совершенствование технологии получения водоугольных суспензий* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: КГТУ, 2006. 112 с. [Baranova M.P. *Improving the technology for obtaining water-coal suspensions* [D]. Diss. ... cand. tech. Sciences, Krasnoyarsk: KSTU, 2006. 112 (in Rus.)].

[14] Кулагина Т.А. *Эффективность подготовительных процессов сжигания водо-топливных смесей в топках малого объема* [D]. Дисс. ... докт. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2009. 340 с. [Kulagina T. A. *The efficiency of preparatory processes for the combustion of water-fuel mixtures in small-volume furnaces* [D]. Diss. ... doc. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2009. 340 (in Rus.)].

[15] Евстигнеев В.В. *Совершенствование технологии кондиционирования сточных вод энергетических систем и комплексов* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2012. 123 с. [Evstigneev V.V. *Improving the technology of wastewater conditioning of energy systems and complexes* [D]. Diss. ... cand. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2012. 123 (in Rus.)].

[16] Дубровская О.Г. *Технология гидротермодинамической обработки природных и сточных вод с использованием эффектов кавитации* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2007. 134 с. [Dubrovskaya O.G. *Technology of hydrothermodynamic treatment of natural and waste waters using cavitation effects* [D]. Diss. ... cand. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2007. 134 (in Rus.)].

[17] Стебелева О.П. *Кавитационный синтез наноструктурированного углеродного материала* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2011. 134 с. [Stebeleva O.P. *Cavitation synthesis of nanostructured carbon material* [D]. Diss. ... cand. tech. Sciences, Krasnoyarsk: SFU, 2011. 134 (in Rus.)].

[18] Пьяных Т.А. *Повышение эффективности суперкавитационных испарителей* [D]. Дисс. ... канд. техн. наук, Красноярск: СФУ, 2013. 126 с. [Pyanykh T. A. *Improving the efficiency of supercavitation evaporators* [D], Sib. Feder. Un-t, Krasnoyarsk, 2013 (PhD thesis) (in Rus.)].

- [19] Okolie, J.A., Ivan Escobar, J., Umenweke, G., Khanday, W., Okoye, P.U. Continuous biodiesel production: A review of advances in catalysis, microfluidic and cavitation reactors [J]. (2022) *Fuel*, 307, 121821. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121821.
- [20] Alias E.A., Hagos F. Y., Ishak M. I., Dzaharudin, F., Abdullah A. A., Asyraff A. Performance and Emission Characteristics of Microbubble-Enhanced Fuels in a Diesel Engine [J] (2021) *Energy and Fuels*, 35(3), 2630–2638. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03204.
- [21] Spiridonov, E.K., Bityutskikh, S. Y. Simulation Model and Characteristics of the Cavitation Mixer with Hydrodynamic Grid [J] (2016) *Procedia Engineering*, 150, 210–214. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.748.
- [22] Setyawan M., Mulyono P., Sutijan, Budiman A. Comparison of Nannochloropsis sp. cells disruption between hydrodynamic cavitation and conventional extraction [J] (2018) *MATEC Web of Conferences*, 154, 01023,. DOI: 10.1051/mateconf/201815401023.
- [23] Ивченко В.М., Есиков С.А. Биологические эффекты гидродинамической кавитации [J]. *Гидродинамика больших скоростей*; КрПИ. Красноярск, 1989. Вып. 1. 23–35. [Ivchenko V. M., Esikov S. A. Biological effects of hydrodynamic cavitation [J]. *Hydrodynamics of high speeds*. Krasnoyarsk: KrPI, 1989. Issue. 1. 23–35 (in Rus.).]
- [24] Esikov S.A., Ivchenko V.M., Kulagin V.A. Cavitation biomechanics and technology [J]. *Pr. Fifth National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*. Varna: BIHS, 1985. V. 1. 20.1–20.8.
- [25] Кулагин В.А., Радзюк А.Ю. Кавитационная подготовка высококонцентрированных малорастворимых полидисперсных субстратов для биотехнологических процессов на базе водоугольных суспензий [J]. *Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Сб. докладов Всерос. НИПК*, Красноярск: РАО «ЕС России», 21–23 ноября 2000. 417–423. [Kulagin V. A., Radzyuk A. Yu. Cavitation preparation of highly concentrated poorly soluble polydisperse substrates for biotechnological processes based on coal-water suspensions [J]. *Problems of using Kansk-Achinsk coals at power plants: Sat. reports Vseros. NPK*, Krasnoyarsk: RAO «ES of Russia», November 21–23, 2000. 417–423 (in Rus.).]
- [26] Немчин А.Ф. и др. *Гидродинамические методы интенсификации процессов очистки диффузионного сока* М.: ЦНИИТЭИпищепром.1984. Пищ. пром. Сер. 23. Сахарн. пром.: Обзор. информ. Вып. 8. 28 с. [Nemchin A. F. et al. *Hydrodynamic methods of intensifying the processes of purification of diffusion juice* М.: TsNIITEIpushcheprom, 1984. Pishch. prom. Ser. 23. Sugar. prom.: Review. inform. Issue 8. 28 (in Rus.).]
- [27] Кулагин В.А. *Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации*: Дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14, 01.02.05. Красноярск: КГТУ, 2004. 379 с. [Kulagin V. A. *Methods and means of technological processing of multicomponent media using cavitation effects* [D]. Diss. ... Dr. tech. sciences. KSTU Krasnoyarsk, (2004) 406 (in Rus.).]
- [28] Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M., Grzymała, W., Głąb, T., Bajda, T. Cavitated charcoal—An innovative method for affecting the biochemical properties of soil [J]. (2021) *Materials*, 14(9), 2466, DOI: 10.3390/ma14092466.
- [29] Zheplinska, M., Mushtruk, M., Salavor, O. Cavitation Impact on Electrical Conductivity in the Beet Processing Industry [J]. (2021) *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 755–762. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_73.

- [30] Mishchenko, V., Semenov, A., Yatsenko, V., Stepanova, T. Liquid organic waste purification on the example of beet-sugar production using cavitation hydrodynamic generators [J]. (2021) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1259 AISC, 209–224. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6\_18.
- [31] Ciriminna R., Forest B., Meneguzzo F., Pagliaro M., Hamann M. T. Technical and economic feasibility of a stable yellow natural colorant production from waste lemon peel [J]. (2020) *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(19), 6812. DOI: 10.3390/app10196812.
- [32] Ricaurte, L., Perea-Flores, M.D.J., Martinez, A., Quintanilla-Carvajal, M. X. Production of high-oleic palm oil nanoemulsions by high-shear homogenization (microfluidization) [J]. (2016) *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 75–85. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.04.004.
- [33] Zhilin Wu, Daniele F. Ferreira, Daniele Crudo, Valentina Bosco, Livio Stevanato, Annalisa Costale and Giancarlo Cravotto, Plant and Biomass Extraction and Valorisation under Hydrodynamic Cavitation [J]. (2019), *Processes*, 7(12), 965. Doi.org/10.3390/pr7120965.
- [34] Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I. A. Simulation of flooded and unflued jets for improving technology of high-pressure purification of oil and gas field equipment [J]. (2020) *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2020 (12), 124–127. DOI: 10.24887/0028–2448–2020–12–124–127.
- [35] Omelyanyuk, M.V., Pakhlyan, I. A. Technological application of cavitating jet streams in the oil and gas industry [J]. (2019) *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2019 (11), 130–133. DOI: 10.24887/0028–2448–2019–11–130–133.
- [36] Zemenkov Y.D., Zemenkova M. Y., Vengerov A. A., Brand A. E. Application of Technology of Hydrodynamic Cavitation Processing High-Viscosity Oils for the Purpose of Improving the Rheological Characteristics of Oils [J]. (2016) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 154(1), 012026. DOI: 10.1088/1757–899X/154/1/012026.
- [37] Montes D., Cortés F. B., Franco C. A. Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO<sub>2</sub> nanoparticles [Reducción de la viscosidad de crudos pesados mediante cavitación por ultrasonido asistida por nanopartículas de SiO<sub>2</sub> funcionalizadas con nanocristales de NiO] [J]. (2018) *DYNA (Colombia)*, 85 (207), 153–160. DOI: 10.15446/dyna.v85n207.71804.
- [38] Artamonov V.Y., Ganiev S.R., Kuznetsov Y.S., Pustovgar A.P., Sultanov D.R., Shmyrkov O. V. Laboratory and Field Testing of Wave Machines and Devices for Preparation of Fine-Particle Suspensions [J]. (2018) *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 47(1), 104–111. DOI: 10.3103/S 1052618818010028.
- [39] Zhou J.Z., Li H., Chow R. S., Liu Q., Xu Z., Masliyah J. Role of mineral flotation technology in improving bitumen extraction from mined Athabasca oil sands – II. Flotation hydrodynamics of water-based oil sand extraction [J]. (2020) *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(1), 330–352. DOI: 10.1002/cjce.23598.
- [40] Olesya Stebeleva and Andrey V. Minakov Application of Cavitation in Oil Processing: An Overview of Mechanisms and Results of Treatment. *ACS Omega* 2021, 6, 31411–31420 <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05858>.
- [41] Кулагина Л.В. Повышение энергоэффективности и экологической безопасности при сжигании водомазутной эмульсии в теплотехнологических установках, Экология и безопасность жизнедеятельности: Матер. VI Междунар. НПК. Пенза: ТГУ, 2006. 125–128 [Kulagina L. V. Improving energy efficiency and environmental safety during the combustion of oil-

water emulsion in heat-engineering installations, *Ecology and life safety: Mater. VI Intern. NPK*. Penza: TGU, 2006. 125–128 (in Rus.).

[42] Кулагина Л. В. Методы оценки ущерба от загрязнения атмосферы вредными выбросами нефтеперерабатывающих производств, *Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всерос. НПК*. Красноярск: Краевое НТО, 2005. Вып. XI. 82–96 [Kulagina L. V. Methods for assessing the damage from atmospheric pollution by harmful emissions from oil refineries, *Social. problems of engineering ecology, environmental management and resource conservation: Materials of the All-Russian. NPK*. Krasnoyarsk: Regional NTO, 2005. Issue. XI. 82–96 (in Rus.).]

[43] Кулагина Л. В. Анализ теплофизических и гидродинамических процессов при сжигании различных видов топлив в энергетическом котле КВ-ТМ-180–150–25, Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всерос. НПК. Красноярск: Краевое НТО, 2004. Вып. X. 29–45 [Kulagina L. V. Analysis of thermophysical and hydrodynamic processes during the combustion of various types of fuels in a power boiler KV-TM-180–150–25, Social problems of engineering ecology, environmental management and resource saving: Proceedings of Vseros. NPK. Krasnoyarsk: Regional NTO, 2004. Issue. X. 29–45 (in Rus.).]

[44] Кулагина Л. В. Проблема ингерентности и ликвидности перспективных энергогенерирующих систем, *Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения: Материалы Всерос. НПК*. Красноярск: Краевое НТО, 2003. Вып. IX. 45–56 [Kulagina L. V. The problem of inherence and liquidity of promising energy generating systems, Social. problems of engineering ecology, environmental management and resource saving: Proceedings of Vseros. NPK. Krasnoyarsk: Regional NTO, 2003. Issue. IX. 45–56 (in Rus.).]

[45] Kashkina L.V., Kulagin V.A., Stebeleva O.P., Kulagina L.V. Recycling carbonaceous materials by cavitation nanotechnology techniques [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2011. 4(5) 358–372 (in Rus.).

[46] Кулагин, В.А., Кашкина Л.В., Кулагина Л.В., Стебелева О.П. Получение углеродосодержащих наноструктур методами кавитационной технологии. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2010. 12. 34–38 [Kulagin V.A., Kashkina L.V., Stebeleva O.P., Kulagina L.V. Preparation of carbon-containing nanostructures by cavitation technology [J], *Chemical and Petroleum Engineering*, 2011, 46(11), 767–773. Doi: 10.1007/s 10556–011–9415–0].

[47] Стебелева, О.П., Кашкина Л.В., Кулагин В.А. Получение углеродных наномодификаторов для смазочных материалов с использованием кавитационной технологии [J]. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2011. 13. 1(2). 401–403 [Stebeleva, O.P., Kashkina L.V., Kulagin V.A. Obtaining carbon nanomodifiers for lubricants using cavitation technology [J]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011. V. 13. No. 1(2). 401–403 (in Rus.).]

[48] Kulagin, V.A., Stebeleva O.P., Kulagina L.V., Kashkina L.V. Production of Carbonaceous Nanostructures using the Methods of Cavitation Technologies [J]. *Chemical and Petroleum engineering*. 2010. 47(1–2). 222–234;

[49] Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Kulagin V.A., Emelyanova T.Y. Nanomodifiers based on cavitationaly activate wood carbon-black [J]. *Journal of International Scientific Publications:*

*Materials, Methods Technologies* (Bulgaria), 2013. 7, Part 2. ISSN 1313–2539, www.scientific-publications.ne;

[50] Kashkina L.V., Kulagin V.A., Stebcleva O.P., Likhachev D.S., Petrakovskaya E.A. Senergy Nanostruring Carbon Materials Based on Cavitation [J]. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2011. 4(3). 310–325.

[51] Кулагин В.А. Кашкина Л.В., Стебелева О.П., Кулагина Л.В. Утилизация золы на базе физико-химических превращений при кавитационном воздействии [J]. *Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)*. 2009. 14(6). 238–242 [Kulagin V.A. Kashkina L.V., Stebeleva O.P., Kulagina L.V. Ash utilization based on physicochemical transformations under cavitation action [J]. *Bulletin of the International Academy of Sciences of Ecology and Life Safety (MANEB)*. 2009. 14(6). 238–242 (in Rus.)].

[52] Kashkina L.V., Kulagin V.A., Stebeleva O.P., Likhachev D.S. Cavitation use for obtaining carbon nanomaterials [J]. *ECOLOGY plus*. 2010. 4(19). 718. (Ukraine).

[53] Kucherik A.O., Ryabchikov Y.V., Kutrovskaya S.V., Al-Kattan A., Arakelyan S.M., Itina T.E., Kabashin A.V. Cavitation-Free Continuous-Wave Laser Ablation from a Solid Target to Synthesize Low-Size-Dispersed Gold Nanoparticles [J]. (2017) *ChemPhysChem*, 18(9), 1185–1191. DOI: 10.1002/cphc.201601419.

[54] Shih C.-Y., Chen C., Rehbock C., Tymoczko A., Wiedwald U., Kamp M., Schuermann U., Kienle L., Barcikowski S., Zhigilei L.V. Limited Elemental Mixing in Nanoparticles Generated by Ultrashort Pulse Laser Ablation of AgCu Bilayer Thin Films in a Liquid Environment: Atomistic Modeling and Experiments [J]. (2021) *Journal of Physical Chemistry C*. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c09970.

[55] Stebeleva, O.P., Kashkina, L.V., Petrakovskaya, E.A., Rubleva, T.V., Nikitin, S.L., Vshivkova, O.A. Nonequilibrium carbon black suspensions used in synthesis of polymer composite material [J] (2020) *Journal of Physics: Conference Series*, 1515(2), 022003. DOI: 10.1088/1742–6596/1515/2/022003.

[56] Slizneva, T.E., Akulova, M.V., Razgovorov, P.B. Influence of mechanomagnetic activation of solutions CaCl<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on phase structure of cement stone [J] (2019) *ChemChemTech*, 62 (12), 101–107. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114

[57] Krivenko, P.V., Guzii, S.G., Hela, R. The influence of cavitation treatment on nano structuring of alkali aluminosilicate binder for intumescent coatings [J]. (2017) *Materials Science Forum*, 908 MSF, 63–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.908.63.

[58] Кулагина Т.А., Попков В.А. Влияние кавитационно-активированной воды на характеристики цементного компаунда [J]. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2015, 8(3), 362–368 [Kulagina T.A., Popkov V.A. Influence of cavitation activated water on the characteristics of the cement compound [J]. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015, 8(3), 362–368 (in Rus.)].

[59] Кулагина Т.А., Попков В.А. Подготовка радиоактивных отходов к длительному хранению (захоронению) с помощью цементных компаундов [J]. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 2015, 8(7), 917–927, DOI: 10.17516/1999–494X-2015–8–7–917–927 [Kulagina T.A., Popkov V.A. Preparation of radioactive waste for long-term storage (burial) using cement compounds [J]. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015, 8(7), 917–927, DOI: 10.17516/1999–494X-2015–8–7–917–927 (in Rus.)].

[60] Kulagin V., Kulagina T., Nikiforova E., Prikhodov D., Shimanskiy A., Li F.-Ch. Inclusion of liquid radioactive waste into a cement compound with an additive of multilayer carbon nanotubes.

IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science [J]. 227 (2019) 052030, 1–12; DOI: 10.1088/1755–1315/227/5/052030.

[61] Ermolin, V.N., Bayandin, M.A., Kazitsin, S.N. Mechanical Activation of Wood for Adhesive-free board Production [J]. (2016) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 155 (1), 012038. DOI: 10.1088/1757–899X/155/1/012038.

[62] Laouari A., Ghenaiet A. Investigation of steady and unsteady cavitating flows through a small Francis turbine [J]. (2021) *Renewable Energy*, 172, 841–861. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.080.

[63] Емельянова Т.Ю., Кашкина Л.В., Кулагин В.А., Стебелева О.П., Петраковская Э.А., Немцев И.В., Редькин В.Е. Влияние добавок глобулярного углерода на реологические свойства водоугольных суспензий [J]. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 8. 5–11 [Yemelyanova T. Yu., Kashkina L. V., Kulagin V. A., Stebeleva O. P., Petrakovskaya E. A., Nemtsev I. V., Red'kin V. E. Effect of globular carbon addition on rheological properties of coal-water suspension. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 8. 5–11 (in Rus.)].

[64] Dzhundubaev A.K., Sultanaliev M.S., Murko V.I., Kulagina L.V., Baranova M.P. Flow regimes of fuel water-coal suspensions in the channels of spraying devices [J]. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2018, 11(2), 242–249. DOI: 10.17516/1999–494X-0027 (in Rus.).

[65] Баранова, М.П., Кулагин В.А., Тарабанько В.Е. Природа стабилизации водоугольных топливных суспензий [J]. *Журнал прикладной химии*. 2011. Т. 84. Вып. 6. 916–921 [Baranova M. P., Kulagin V. A., Tarabanko V. E. The nature of the stabilization of water-coal fuel suspensions [J]. *Journal of Applied Chemistry*. 2011. V. 84. Issue. 6. 916–921 (in Rus.)].

[66] Zasyrkin I., Murko V., Fedyaev V., Baranova M. Systems of ignition and combustion stabilization for water-coal fuel [J]. *J. Thermal Science*. 2012. 16(4), 1329–1338.

[67] Murko V., Fedyaev V., Karpenok V., Dzuzyba D., Baranova M. Application of swirl combustion technique on reduction of toxic substance in coal water mixture combustion products [J]. *J. Clean coal technology*. 2012. 5, 73–75; (China).

[68] Мурко В.И., Джундубаев А.К., Султаналиев М.С., Кулагин В.А., Баранова М.П. Разработка технологии получения водоугольного топлива из бурых углей месторождения Кара-Кече Кыргызской Республики [J]. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2022, 15(6). 648–657. DOI: 10.17516/1999–494X-0422 [Murko V.I., Dzhundubayev A.K., Sultanaliev M.S., Kulagin V.A., Baranov M.P. Development of technology of receiving water coal fuel from brown coals of a field a Kara-Kече of the Kyrgyz Republic [J]. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2022, 15(6), 648–657. DOI: 10.17516/1999–494X-0422].

[69] Мурко В.И., Хямьяляйнен В.А., Волков М.А., Баранова М.П. Возможности и перспективы реализации отходов технологии обогащения углей [J]. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2019, 6, 165–172 [Murko V.I., Khyamyalyainen V.A., Volkov M.A., Baranova M.P. The opportunities and prospects for the implementation of non-waste coal preparation technology [J], *Journal Mountain Information and Analytical Bulletin*, 2019, 6, 165–172 (in Rus.)].

[70] M. Alaa Musalam and Abdel Fattah A. Qaraman. The thermal behavior of the coal-water fuel

(CWF) [J]. *International Journal of Energy and Environmental Research*, 2016, 4(3). 27–36.

[71] Baranova M.P., Qian Li, Zhi-Ying Zheng, Feng-Chen Li, Kulagin V.A., Likhachev D. Utilization slurry coal-water Fuel [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2014, 7(4), 474–480 (in Rus.).

[72] Murko V, Karpenok V, Fedyaev V and Chernykh D Results of tests of a fuel additive on a coal-fired boiler [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017, 10 (8), 474–480 (in Rus.).

[73] Murko V.I., Khyamyalyainen V. A. and Baranova M. P. The Creation of a Low-Capacity Boiler Plant on Coal-Enrichment Waste [J], 2019, *International Science and Technology Conference «EastConf»*, Vladivostok, Russia, 2019, 1–4. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725397.

[74] Murko V., Baranova M., Grishina I The intensification of the solid fuel grate-firing process [J], *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1261**, 2019, 012024.

[75] Karpenok V.I., Murko V.I., Mastikhina V. P., Loboda Yu. A. Thermodynamic and chemical analysis of water-coal fuel ignition and combustion in adiabatic combustion chamber [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2021, 14(4), 385–398.

[76] Zroychikov, N.A., Kormilitsyn, V.I., Borozdin, V.S., Pay, A.V. A Review of Technologies for Treatment of Fuel Oil during Storage and Preparation for Burning in Boiler Units' Furnaces (2020) *Thermal Engineering*, 67(2), 106–114. DOI: 10.1134/S 0040601520020068.

[77] Mal'tsev, L.I., Belogurova T. P. & Kravchenko I. V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels [J], (2017) *Thermal Engineering*, 64, 585–590. Doi.org/10.1134/S 0040601517080067.

[78] Li, K., Chen, H., Lei, J., Zhang, D., Chen, J., Liu, X., Han, H. Study on desulfurization of petroleum coke from vacuum residue delayed coker [J], (2019) *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 50(7), 52–57.

[79] Stebeleva O.P., Kashkina L. V., Petrakovskaya E. A., Nikitin S. L., Valiullin T. R. The impact of cavitation-activated water on combustion dynamics and environmental characteristics of coal-water slurry fuel [J], (2019) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537 (6), 062056. DOI: 10.1088/1757–899X/537/6/062056.

[80] Olesya P. Stebeleva, Ludmila V. Kashkina, Andrey V. Minakov, and Olga A. Vshivkova Impact of Hydrodynamic Cavitation on the Properties of Coal-Water Fuel: An Experimental Study [J], *ACS Omega*. 2022, 7, 37369–37378; doi.org/10.1021/acsomega.2c03979.

[81] Мурко В.И., Карпенко В.И., Баранова М.П. Вихревой способ сжигания водоугольного топлива из шламов углеобогащения [J], *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2022, 15(3). 338–345. DOI: 10.17516/1999–494X-0400 [Murko V.I., Karpenok, V.I. and Baranova, M. Vortex method of water-coal combustion fuel from coal preparation sludge [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2022, 15(3), 338–345. DOI: 10.17516/1999–494X-0400].

[82] News research & development: Biofuel production: Bubbles break down biomass [J], (2016) *TCE The Chemical Engineer*, (898), 21.

[83] Liudmila Kulagina, Tamara Yenutina, and Irina Kirillova Increasing the energy efficiency and environmental safety of the operation of small-volume furnaces by adding a water-fuel mixture and organic components. *E 3S Web of Conferences* **295**, 02002 (2021), (WFSDI 2021); doi.org/10.1051/e3sconf/202129502002.

[84] Кулагина Л.В., Штым К. А., Кириллова И. В. Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы [J], *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2022. 2(26). 104–114; DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.010 [Kulagina L. V., Shtym K. A., Kirillova I. V. Improving the technology of heat energy production using biomass [J], *Information and mathematical technologies in science and management*. 2022.2(26). 104–114; DOI: 10.38028/ESI.2022.26.2.010 (in Rus.)].

[85] Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кулагин В.А., Жижаев А.М., Ткач С.П. Сухие остатки стоков – перспективное энергетическое топливо [J], *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2022, 15(4). 422–434. DOI: 10.17516/1999–494X-0404 [Zhuikov A. V., Matushenko A. I., Kulagin V. A., Zhizhaev A. M., Tkach S. P. Dry Residues of Sewage – a Promising Energy Fuel. [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* 2022, 15(4), 422–434. DOI: 10.17516/1999–494X-0404 (in Rus.)].

[86] Шеленкова В.В. *Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением* [D], Дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: ОАО «НПО ЦКТИ», 2021 .116 с. [Shelenkova V. V. *Improving the technology of decontamination of equipment with radioactive contamination* [D], Diss. ... cand. tech. Sciences. St. Petersburg: JSC NPO CKTI, 2021 .116 (in Rus.)].

[87] Кулагина Т.А., Кулагин В.А., Матюшенко А.И. *Техносферная безопасность в ядерной энергетике*. Красноярск: Изд-во «Гротеск», СФУ, 2014. 286 с. [Kulagina T. A., Kulagin V. A., Matushenko A. I. *Technospheric safety in nuclear power engineering*. Krasnoyarsk: Grotesk Publishing House, Siberian Federal University, 2014. 286 (in Rus.)].

[88] Кулагина Т.А., Козин О.А., Попков В.А. *Обращение с радиоактивными отходами*. Красноярск: Изд-во «Гротеск», СФУ, 2018. 183 с. [Kulagina T. A., Kozin O. A., Popkov V. A. *Handling of radioactive waste*. Krasnoyarsk: Grotesk Publishing House, Siberian Federal University, 2018. 183 (in Rus.)].

[89] Кулагина Т.А., Кулагин В.А. Растворение алюмосиликатных осадков в хранилищах жидких РАО, *Радиоактивные отходы*. 2020. 2(11). 75–84. DOI: 10.25283/2587–9707–2020–2–75–84 [Kulagina T. A., Kulagin V. A. Dissolution of aluminosilicate sediments in storage facilities for liquid radioactive waste, *Radioactive waste*. 2020.2(11). 75–84. DOI: 10.25283/2587–9707–2020–2–75–84 (in Rus.)].

[90] Shelenkova V.V., Kormich A.I., Kozin O.A., Kulagina T.A. Decontamination of the equipment from radioactive contamination of water after cavitation treatment. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2018. 11(6). 732–743. DOI: 10.17516/1999–494X-0088.

[91] Шеленкова В.В., Кормич А.И., Козин О.А., Кулагина Т.А. Дезактивация оборудования от радиоактивного загрязнения водой после кавитационной обработки [J], *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2018. 11(6). 732–743; DOI: 10.17516/1999–494X-0088 [Shelenkova V. V., Kormich A. I., Kozin O. A., and Kulagina T. A. Tech. Decontamination of equipment from radioactive contamination by water after cavitation treatment [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2018.11(6). 732–743; DOI: 10.17516/1999–494X-0088 (in Rus.)].

[92] Кулагина Т.А. Шеленкова В.В. Способы дезактивации поверхностей с радиоактивным загрязнением [J], *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2017. 10(3). 352–363; DOI: 10.17516/1999–494X-2017–10–3–352–363 [Kulagina T. A., Shelenkova V. V. Methods of decontamination of surfaces contaminations [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017. 10(3). 352–363. DOI: 10.17516/1999–494X-2017–10–3–352–363 (in Rus.)].

[93] Гафарова В.В. (Шеленкова В.В.), Кулагина Т.А. Безопасные методы утилизации радиоактивных отходов [J], *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2016. 9(4). 585–597; DOI: 10.17516/1999–494X-2016–9–4–585–597 [Gafarova V. V. Safe methods of radioactive waste utilization [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2016. 9(4). 585–597. DOI: 10.17516/1999–494X-2016–9–4–585–597 (in Rus.)].

[94] Шеленкова В.В., Кулагина Т.А. Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением [J], *Радиоактивные отходы*. 2021. 1(14). 28–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-28-38 [Shelenkova V. V., Kulagina T. A. Refinement of a decontamination technology for radioactively contaminated equipment [J], *Radioactive waste*, 2021, no. 1(14), 28–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-28-38 (in Rus.)].

[95] Кулагина Т.А., Кулагин В.А., Москвичев В.В., Попков В.А. Применение кавитационной технологии в процессах обращения с отработавшим ядерным топливом [J], *Экология и промышленность России*. 2016. 20(10). 4–10. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-10-4-10 [Kulagina T. A., Kulagin V. A., Moskvichev V. V., and Popkov V. A., Tech. Application of cavitation technology in spent nuclear fuel handling processes [J], *Ecology and Industry of Russia*. 2016. V. 20. No. 10. 4–10. DOI: 10.18412/1816-0395-2016-10-4-10 (in Rus.)].

[96] Kulagin V.A., Kulagina T. A., Popkov V. A. Environmental Effects of Cavitation Technology for Radioactive Waste Management [J], *Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, 53(11–12), 738–744: doi.org/10.1007/s10556-018-0414-2;

[97] Кулагина Т.А., Попков В.А. Метод обращения с отходами ядерного топлива в атомной энергетике [J], *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2015, 8(2), 194–204 [Kulagina T. A., Popkov V. A. Nuclear fuel waste management method in the nuclear power industry [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015, 8(2), 194–204 (in Rus.)].

[98] Wang, Y.-J., Jin, R.-Y., Kong, W.-D., Wang, T.-S. Study on the degradation of phenol wastewater by the combination of Venturi pipe with orifice plate [J], (2017) *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry*, 37 (4), 160–163. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.04.039.

[99] Sotiriadis, K., Guzii, S., Kumpová, I., Mácová,, Viani, A. The effect of firing temperature on the composition and microstructure of a geocement-based binder of sodium water-glass [J], (2017) *Solid State Phenomena*, 267 SSP, 58–62. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.58.

[100] Wu, Z.-L., Wang, W.-M., Li, W.-X., Zhao, Y., Tang, C.-D., Cravotto, G. Practical application of technology combining ozonation with hydrodynamic cavitation to algae removal from water [J], (2016) *Journal of Ecology and Rural Environment*, 32(3), 1673–4831 (2016) 03–0500–07, 500–506. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.03.025.

[101] Zhang X., Zhang Y., Tian Y., Zhang X., Zhang Z., Liu R. Analysis on Application Effectiveness of Ballast Water Treatment Based on Advanced Oxidation Processes [船舶压载水高级氧化处理技术海域应用效果分析] [J], (2019) *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 45(8), 2681–2688. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180619007.

[102] Karamah E.F., Primasto A. R., Najeges R. R., Bismo S. Treatment of Tofu industry’s wastewater using combination of ozonation and hydrodynamic cavitations method with venturi injector [J], (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1198 (6), 062007, DOI: 10.1088/1742-6596/1198/6/062007.

[103] Dubrovskaya O.G., Evstigneev V. V., Kulagin V. A. Problems of biofouling in circulating systems of closed cycles of water use and ways to solve them [J], *Safety of life*, 2012, No. 3, 26–30 (in Rus.).

[104] Dubrovskaya O.G., Evstigneev V. V., Kulagin V. A. Waste water conditioning of energy systems and complexes [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 4(6) (2011), 629–641 (in Rus.).

[105] Dubrovskaya O.G., Kulagin V. A., Sapozhnikova E. S. Modern layouts of technological schemes for wastewater treatment using cavitation technology [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 8(2) (2015), 217–223 (in Rus.).

[106] Dubrovskaya O.G., Andrunyak I.V., Priymak L.V. *Resource-saving technologies for neutralization and utilization of waste from enterprises of the heat and power complex of the Krasnoyarsk Territory* [M], Krasnoyarsk: Sib. Feder. un-t, 2014, 164 (in Rus.).

[107] Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Cavitation in wastewater treatment technologies [J], *In the world of scientific discoveries*, 2010, No. 5–1, 87–90 (in Rus.).

[108] Kurilina T.A., Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Matyushenko A.I., Bobrik A.G. The prospects of utilizing the modified sorption material to intensify purification of waste water from electroplating production [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 12(2) (2019) 182–191. DOI: 10.17516/1999–494X-0127 (in Rus.).

[109] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A. Non-reagent cleaning of industrial wastewater, containing heavy metals based on technology of hydrothermodynamic cavitation [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 12(4) (2019) 460–467. DOI: 10.100–10417516/1999–494X-0153 (in Rus.).

[110] 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], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2020, 13(8), 991–1001. DOI: 10.17516/1999–494X-0280.

[111] Kulagin V.A., Dubrovskaya O.G., Gudkov D.N., Matyushenko A.I. The Technology of Obtaining Modified Sorbents Based on Silicate Production Waste [J], 2019 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 288 (2019) 012013; doi:10.1088/1755–1315/288/1/012013;

[112] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Kurilina T.A. Intensification of biological wastewater treatment processes of the food complex companies on the basis of hydro-thermodynamic cavitation [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2018, 11(5), 584–590. DOI: 10.17516/1999–494X-0057.

[113] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Yao Limin Development of wastewater treatment technology of the galvanic productions [J], *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) 2021*.

[114] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Yao Limin The alternative method of conditioning industrial wastewater containing heavy metals based on the hydrothermodynamic cavitation technology [J], *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 941 (2020) 012009; doi:10.1088/1757–899X/941/1/012009.

[115] Шеленкова В.В., Кулагина Т.А., Стебелева О.П., Сапожникова Е.С. Определение времени релаксации физико-химических характеристик воды после кавитационной обработки. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2021. 14(5). 550–563. DOI: 10.17516/1999–494X-0332 [Shelenkova V.V., Kulagina T.A., Stebeleva O.P., Sapozhnikova E.S. Determination of the relaxation time of the physico-chemical characteristics of water after cavitation treatment. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2021.14(5). 550–563. DOI: 10.17516/1999–494X-0332 (in Rus.)].

[116] Кулагин В.А., Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Феноменологическая модель гидродинамического кавитационного воздействия на водные системы. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2019. 12(7). 818–829. DOI: 10.17516/1999–494X-0182 [Kulagin V.A., Kulagina T.A., Shelenkova V.V. Phenomenological model of hydrodynamic cavitation influence on water systems. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2019. 12(7). 818–829. DOI: 10.17516/1999–494X-0182 (in Rus.)].

[117] Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Моделирование процессов в суперкавитационном испарителе с учетом термодинамических эффектов. *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* 2014. 1. 18–20 [V.A. Kulagin, T.A. P'yanykh, Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects [J], *Chemical and Petroleum Engineering.* 50 (1–2) (2014) 24–29].

[118] Likhachev D.S., Li F.C., Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives [J], *Desalin. Water Treat.* 51 (13–15) (2013) 2836–2849.

[119] Likhachev D.S., Li F.C., Kulagin V.A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination [J], *Science China Technological Sciences.* 2014. 57(11). 2115–2130. DOI: 10.1007/s11431–014–5631–0.

[120] Kulagin V.A., Sapoghnikova E. S., Stebeleva O.P., Kashkina L. V., Zhi-Ying Zheng, Qian Li, Feng-Chen Li, Features of influence of cavitation effects on the physicochemical properties of water and wastewater [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2014, 7(5). 605–614.

[121] Machinski A. S. *Hydrodynamics and Thermal Transfer Characteristics of Supercavitating Evaporators for Water Desalination* [D], Russian State Library, Moscow, 1984, 1–285 (PhD Thesis) (in Rus.).

[122] Zhi-ying Zheng, Qian Li, Lu Wang, Li-ming Yao, Wei-hua Cai, Hui Li & Feng-chen Li Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape [J], (2020) *Journal of Hydrodynamics*, 32, 468–485.

[123] Zhi-Ying Zheng, Lu Wang, Wei-Hua Cai, Xin Zheng, Qian Li, Tomoaki Kunugi, Hui Li, Feng-Chen Li, Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination [J], (2020) *Journal of Fluids Engineering Copyright VC*, 142/051205–1.

[124] Li Q., Cheng J.P., Zheng Z. Y., Li F. C., Kulagin V. A. Numerical simulation research on the optimization for blade shape of rotational supercavitating evaporator [J], (2015) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 72 (Forum 6), 062055. DOI: 10.1088/1757–899X/72/6/062055.

[125] Zheng, Z.Y., Cheng J.P., Li F.C., Zhang M., Li Q., Kulagin, V.A. Numerical simulation of the temperature effects on the performance of rotational supercavitating evaporator [J], (2015) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 72 (Forum 6), 062054, DOI: 10.1088/1757–899X/72/6/062054.

[126] Zheng Z.-Y., Wang L., Cai W.-H., Zheng X., Li Q., Kunugi T., Li H., Li F.-C. Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination [J], (2020) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 142(5), 051205. DOI: 10.1115/1.4045612.

[127] Zheng Z.-Y., Li Q., Wang L., Yao L.-M., Cai W. H., Kulagin V. A., Li H., Li F.-Ch. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination [J]. *Desalination.* 2019. 455. 1–18. DOI.org/10.1016/j.desal.2018.12.012.

[128] Luo, C., Liu, H., Cheng, L., Wang, C., Jiao, W., Zhang, D. Unsteady flow process in mixed waterjet propulsion pumps with nozzle based on computational fluid dynamics [J], (2019) *Processes*, 7(12), 910,. DOI: 10.3390/PR 7120910.

[129] Ghera, C., Mitelea, I., Bordeasă, I., Crăciunescu, C. Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel [J], (2016) *METAL 2016–25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 706–711.

[130] Banyai, D., Sfarlea, I., Opruta, D. Experimental Research on Variable Hydraulic Resistors of Servo-hydraulic Valves [J], (2016) *Energy Procedia*, 85, 44–51. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.273.

[131] Lee S., Jang D.-Y., Wang X. Y., Kim P., Sun W., Seok J. Lubrication characteristics of a textured porous sliding bearing [J], (2015) *Advances in Mechanical Engineering*, 7 (3), 1–13. DOI: 10.1177/1687814015573618.

[132] Miyanaga N., Tomioka, J. Linear and nonlinear stability analysis of hydrodynamic journal bearings using mass-conservative cavitation model [J], (2019) *Jurnal Tribologi*, 22, 61–73.

[133] Ding, A., Xiao, Y. Numerical investigation for characteristics and oil-air distributions of oil film in a tilting-pad journal bearing [J], (2018) *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 7B-2018, DOI: 10.1115/GT2018-75888.

[134] Rivera, N.R., Kassim, B., Grigorov, P., Wang, H., Armenante, M., Bu, X., Lekhal, A., Variankaval, N. Investigation of a Flow Step Clogging Incident: A Precautionary Note on the Use of THF in Commercial-Scale Continuous Process [J], (2019) *Organic Process Research and Development*, 23 (11), 2556–2561. DOI: 10.1021/acs.oprd.9b00366.

[135] Vermes A.G., Lettieri C. Source term based modeling of rotating cavitation in turbopumps [J], (2019) *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141 (6), 061002, DOI: 10.1115/1.4042302.

[136] Родионов В. П. *Струйная суперкавитационная эрозия* [М]. Краснодар: КубГТУ, 2003. 264 с. [Rodionov V.P. *Jet supercavitational erosion* [M]. Krasnodar: KubGTU, 2003. 264 (in Rus.)].

[137] Кулагина Л. В. Моделирование пузырьковых кавитационных потоков [J], *Труды КГТУ*, 2006. 1. 140–145 [Kulagina L. V. Modeling of bubble cavitation flows [J], *Proceedings of KSTU*, 2006. No. 1. 140–145 (in Rus.)].

[138] Кулагин В. А., Вильченко А. П., Кулагина Т. А. *Моделирование двухфазных суперкавитационных потоков* [М]. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. 187 с. [Kulagin V. A., Vil'chenko A. P., Kulagina T. A. *Modeling of two-phase supercavitation flows* [M]; Ed. V. I. Bykov, CPI KSTU Publ., Krasnoyarsk (2001) 187 (in Rus.)].

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

[140] Кулагин В. А., Москвичев В. В., Махутов Н. А., Маркович Д. М., Шокин Ю. И. Проблемы физического и математического моделирования в области гидродинамики больших скоростей на экспериментальной базе Красноярской ГЭС [J], *Вестник Российской академии наук*. 2016. 86(11). 978–990. DOI: 10.7868/S 0869587316110062 [V. A. Kulagin, V. V. Moskvichev, N. A. Makhutov, D. M. Markovich, Yu. I. Shokin Physical and Mathematical Modeling in the Field of High-Velocity Hydrodynamics in the Experimental Base of the Krasnoyarsk Hydroelectric Plant [J], *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, 86(6), 454–465. DOI: 10.1134/S 1019331616060034].

[141] Zheng Z.-Y., Li Q., Li F.-Ch., Kulagin V. A. Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedged-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator [J], *Sci. China Tech. Sci.* 2015. 58. 1–12. DOI: 10.1007/s11431-015-5827-y.

[142] Likhachev D.S., Li F.-Ch., Kulagin V. A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination [J], *Sci. China Tech. Sci.* 2014. 57. 2115–2130. DOI: 10.1007/s11431-014-5631-0.

[143] Кулагин В. А., Пьяных Т. А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования [J], *Журнал СФУ. Техника и технологии*. 2012. 5(1). 57–62 [Kulagin V. A. and P'yanyh T. A. Investigation of cavitation flows by means of mathematical modeling [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2012.5(1). 57–62 (in Rus.)].

[144] Vladimir A. Kulagin Numerical study supercavitating of the pump [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2015. 8(5). 317–23; DOI: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-669-674.

[145] Dmitriy S. Likhachev, Vladimir A. Kulagin, Feng-Chen Li Modeling supercavitating flow in supercavitating pumps [J], *Submitted to International Conference on Pumps and Fans (ICPF 2015)*, October 18–21, 2015, Hangzhou, China;

[146] Qian Li, Zheng Z Y, Feng-Chen Li, Vladimir A. Kulagin Numerical study on the thermophysical characteristics of rotational supercavitating evaporator [J], *Submitted to International Conference on Pumps and Fans (ICPF 2015)*, October 18–21, 2015, Hangzhou, China;

[147] Zheng Z Y, Qian Li, Feng-Chen Li, Vladimir A. Kulagin Numerical study on the performance of rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape [J], *Submitted to International Conference on Pumps and Fans (ICPF 2015)*, October 18–21, 2015, Hangzhou, China;

[148] Zheng Z.Y., Li F.C., Li Q., Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedge-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator [J], *SCIENCE CHINA Technol. Sci.* 58 (6) (2015) 1072–1083.

[149] Likhachev D. S. Study on the Hydrodynamic *Characteristics of Rotational Supercavitating Evaporator* [D], Harbin Institute of Technology, Harbin, 2013 (PhD thesis).

[150] Zheng Zhiying, Li Qian, Li Feng-Chen, Kulagin V A, Numerical study on parameter selection for steam extraction of rotational supercavitating evaporator [J], *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33(2): 247–252. Doi: 10.7523/j.issn.2095–6134.2016.02.016 (in Chinese).

[151] Vladimir A. Kulagin Numerical study supercavitating of the pump [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2015 8(5). 317–323; DOI: 10.17516/1999–494X-2015–8–5–669–674;

[152] Yu-Ke Li, Zhi-Ying Zheng, Feng-Chen Li, Kulagina L. V. Numerical study on secondary flows of viscoelastic fluids in straight ducts: Origin analysis and parametric effects [J], *Computers and Fluids*. 152 (2017) 57–73, doi: 10.1016/j.compfluid.2017.04.016;

[153] Кулагина Л.В. Лихачев Д.С. Метод решения задач обтекания решетки суперкавитирующих профилей гидродинамических реакторов [J], *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2009. 10. 15–17 [Kulagina L. V., Lishachev D. S. Method of solving problems of flow past a cascade of supercavitating blades in hydrodynamic reactors [J], *Chemical and Petroleum engineering*. 2009. 45(9) 603–608. Doi: 10.1007/s 10556–010–9245–5].

[154] Радзюк А.Ю., Кулагин В.А., Истягина Е.Б., Пьяных Т.А. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения [J], (2019) *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 12(4), 468–475. DOI: 10.17516/1999–494X-0155 [Radzyuk A. Yu., Kulagin V. A., Istyagina E. B., Pinykh T. A. Modernization of the cavitation stand for the investigation of two-phase flow regimes [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 12(4) (2019) 468–475. DOI: 10.17516/1999–494X-0155 (in Rus.)].

[155] Vladimir A Kulagin, Alexander U Radzyuk, Elena B Istyagina and Tatyana A Pinykh Experimental stand for the study of cavitation flow regimes [J], *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **450** (2018) 032023; doi:10.1088/1757–899X/450/3/032023.

[156] Radzyuk A Yu, Kulagin V A, Istyagina E B, Pyanykh T A and Kolosov M V Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow [J], *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)* 315 (2019) 032027; doi: 10.1088/1755–1315/315/3/032027.

[157] Radzyuk A. Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pyanykh T.A. and Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental

hydrodynamic workbench [J], *Journal of Physics: Conf. Ser.*: 1399 (2019) 022050; doi:10.1088/1742–6596/1399/2/022050.

[158] Alexander Yu Radzyuk, Vladimir A Kulagin, Elena B Istyagina, Tatyana A Pinykh and Mike V Kolosov Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand [J], *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 537 (2019) 042080; doi:10.1088/1757–899X/537/4/042080.

[159] Кулагина Л.В. *Крупномасштабные гравитационные гидродинамические трубы* [М]. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. Гл. 5. 176–224. ISBN 5–7636–0904–2 (978–5–7636–0904–2) [Kulagina L. V. *Large-scale gravitational hydrodynamic tubes* [M]. Krasnoyarsk: CPI KSTU, 2006. Ch. 5. 176–224. ISBN 5–7636–0904–2 (978–5–7636–0904–2) (in Rus.)].

[160] Kulagina L.V., Shtym K. A. Flow past various types of vane mechanisms by a two-phase compressible flow [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2022, 15(4), 505–520. DOI: 10.17516/1999–494X0409.

[161] Кулагина Л.В. Параметрическое описание явлений кипения и кавитации [J], *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* 2018. 11(5). 578–583. DOI: 10.17516/1999–494X-0056 [Kulagina L. V. Parametric description of the phenomena of boiling and cavitation [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2018. 11(5). 578–583. DOI: 10.17516/1999–494X-0056 (in Rus.)].

[162] Kulagin V.A., Kulagina L. V., Li Feng-Chen. Solution of the problem of flow past a wing profile near the interface [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017, 10(4), 523–533. DOI: 10.17516/1999–494X-2017–10–4–523–533; IF 0.588.

[163] Kulagin V. A. Kulagina L. V., Kulagina T. A. Nanotechnology cavitation effects in the heat-and-power engineering and other branches of production [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2008. 1(1). 76–85.

[164] Кулагина Л.В. Исследование систем с распределенными параметрами на базе математического моделирования [J], *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* 2007. 3. 25–27 [Kulagina L. V. Mathematical Modeling of Control Systems for Production Processes with Distributed Parameters [J], *Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, 43(5), 319–322. DOI: 10.1007/sl0556–007–0057–1].

[165] Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуйков А.В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) [J], *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2022. Т. 333. 9. 209–218; DOI 10.18799/24131830/2022/9/3623 [Radzyuk A. Yu., Istyagina E. B., Kulagina L. V., Zhukov A. V. The current state of the use of cavitation technologies (brief review) [J], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources.* 2022. V. 333. 9. 209–218; DOI 10.18799/24131830/2022/9/3623 (in Rus.)].

[166] Kulagina L.V., Kulagina T.A. LSTM Forecasting: Time Series Forecasting to Predict Concentration of Air Pollutants (CO, SO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>2</sub>) in Krasnoyarsk, Russia [J], *Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems: Proceedings of 10th Computer Science On-line Conference 2021, 3; Part of the Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS, 228), 2021, 191–198; doi: 10.1007/978–3–030–77448–6\_17.*

[167] Jin W. Cavitation generation and inhibition. I. Dominant mechanism of turbulent kinetic energy for cavitation evolution [J], (2021) *AIP Advances*, 11 (6), 065028, DOI: 10.1063/5.0050231.

- [168] Kuimov D.N., Minkin M.S. Methods for modeling cavitation in pulp fiber grinding processes [J], (2021) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1029 (1), 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012045.
- [169] Ashok K. Singhal, Mahesh M. Athavale, Huiying Li, Yu Jiang Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model [J], (2002) *J. Fluids Eng.* 124(3), 617–624. Doi.org/10.1115/1.1486223.
- [170] Shen T., Li X., Li L., Wang Z., Liu Y. Evaluation of vorticity forces in thermo-sensitive cavitating flow considering the local compressibility [J], (2021), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 120, 105008.
- [171] Shaofeng Zhang, Xiaojun Li, Bo Hu, Yang Liu, Zuchao Zhu, Numerical investigation of attached cavitating flow in thermo-sensitive fluid with special emphasis on thermal effect and shedding dynamics [J], (2019), *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 5, 3170–3184.
- [172] Luo J.C., Ching H., Wilson B.G., Mohraz A., Botvinick E.L., Venugopalan V. Laser cavitation rheology for measurement of elastic moduli and failure strain within hydrogels [J], (2020) *Scientific Reports*, 10(1), 13144. DOI: 10.1038/s41598-020-68621-y.
- [173] Chandra Shekhar Pant, Yann Delorme and Steven Frankel, Accuracy Assessment of RANS Predictions of Active Flow Control for Hydrofoil Cavitation (2020) *Processes*, 8(6),677. Doi.org/10.3390/pr8060677.
- [174] Izadyar H., Aghababaei A.H., Forghani P., Hajighasemi A. Investigation of rib's effect in cavitation on an axisymmetric separated flow over a longitudinal blunt circular cylinder, [J], (2020), *SN Applied Sciences*, 2, 4, 588.
- [175] Aishvarya Kumar, Ali Ghobadian and Jamshid M. Nouri, Assessment of Cavitation Models for Compressible Flows Inside a Nozzle [J], (2020), *Fluids* 5(3), 134; Doi.org/10.3390/fluids5030134.
- [176] Ni L.-X., Chen Z.-S., Liu Z., Feng X.-F. Hydrodynamic analysis of ultra-high pressure water derusting nozzle [J], (2020) *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2020, 1842–1850.
- [177] Chen, Y., Gong Z., Li, J., Chen X., Lu C. Numerical investigation on the regime of cavitation shedding and collapse during the water-exit of submerged projectile [J], (2020) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 142 (1), 011403, DOI: 10.1115/1.4044831.
- [178] Kamisaka H., Soyama, H. Enhancing the Aggressive Intensity of a Cavitating Jet by Introducing Water Flow Holes and a Long Guide Pipe [J], (2021) *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 143 (3), 031201. DOI: 10.1115/1.4048683.
- [179] Hutli E., Nedeljkovi M.S., Czifrus S. Study And Analysis of The Cavitating And Non-Cavitating Jets Part Two Parameters Controlling The Jet Action And A New Formula For Cavitation Number Calculation [J], (2020) *Thermal Science*, 24 (1 Part A), 407–419. DOI: 10.2298/TSCI190428334H.
- [180] Zhang H., Zuo Z., Mørch K.A., Liu S. Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics [J], (2019) *Physics of Fluids*, 31 (9), 097107. DOI: 10.1063/1.5116156.
- [181] Ganiev S.R., Kuznetsov Y.S., Shmyrkov O.V. Nonlinear Wave and Cavitation Processes and Their Effect on the Mechanical Properties of Viscous Solutions [J], (2019) *Doklady Physics*, 64 (2), 49–52. DOI: 10.1134/S 1028335819020010.

[182] Sun, Y., Guan, Z., Hooman, K. Cavitation in Diesel Fuel Injector Nozzles and its Influence on Atomization and Spray (2019) *Chemical Engineering and Technology*, 42(1), 6–29. DOI: 10.1002/ceat.201800323.

[183] Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I., Koval I.Z., Strutynska L.R., Strogan O.I., Smolarz A., Ormanbekova A., Begaliyeva K. Electromagnetic vibratory cavitator [J], (2019) *Przeglad Elektrotechniczny*, 95 (4), 24–29. DOI: 10.15199/48.2019.04.05.

[184] Wiraputra I.G.P.A.E., Edikresnha D., Munir M. M., Khairurrijal Generation of Submicron Bubbles using Venturi Tube Method [J], (2016) *Journal of Physics: Conference Series*, 739 (1), 012058. DOI: 10.1088/1742–6596/739/1/012058.

[185] Radzyuk A. Yu., Istyagina E. B., Pyanykh T. A., Baranova M. P., Grishina I. I. Verification of the results of numerical modeling of the developed cavitation in a cramped flow by experimental data [J], (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 12192. DOI: 10.1088/1757–899X/734/1/012192.

[186] *Протокол заседания секции гидроэлектростанций и гидротехнических сооружений НК «Научно-технический совет единой энергетической системы» от 25.03.2015 г.* [http://www.nts-ees.ru/sites/default/files/25\\_03\\_15.pdf](http://www.nts-ees.ru/sites/default/files/25_03_15.pdf), <http://nts-ees.ru/sekcii/sekciya-gidroelektrostantsiy-i-gidrotehnicheskikh-sooruzheniy>.

[187] Tatiana Kulagina, Vladimir Kulagin, and Valerii Tereshkov; Development of the circumpolar territories of the Russian Federation [J], *E 3S Web of Conferences* 295, 03007 (2021) WFSDI 2021 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129503007>.

[188] Kulagin V.A., Ivchenko O.A., Kulagina L.V. Current trends of membrane technology development [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 10(1) (2017) 24–35. DOI: 10.17516/1999–494X-2017–10–1–24–35 (in Rus.).

[189] Kulagina L.V. Parametric description of the phenomena of boiling and cavitation [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2018.11(5). 578–583. DOI: 10.17516/1999–494X-0056 (in Rus.).

[190] Kulagin V.A., Kulagina L.V., Li Feng-Chen. Solution of the problem of flow past a wing profile near the interface [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2017, 10(4), 523–533. DOI: 10.17516/1999–494X-2017–10–4–523–533.

[191] Kulagin V.A. Kulagina L.V., Kulagina T.A. Nanotechnology cavitation effects in the heat-and-power engineering and other branches of production [J], *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2008. 1(1). 76–85.

[192] Кулагин В.А., Кулагина Л.В. *Основы кавитационной обработки многокомпонентных сред* [М]. М.: Русайнс, 2017. 230 с. ISBN 978–5–4365–1858–9 [Kulagin V.A., Kulagina L.V. *Fundamentals of cavitation treatment of multicomponent media* [M]. М.: Rusajns, 2017. 230 ISBN 978–5–4365–1858–9 (in Rus.)].

[193] Kulagin V.A., Kulagina L.V., Li F.-C. *Fundamentals of Cavitation Treatment for Multi-component Environments* [M]. М.: Ru-science, 2017. 182 ISBN 978–5–4365–1862–6.

[194] Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Расчет режимных параметров суперкавитационного испарителя [J], *Международный научно-исследовательский журнал*. 2013. 8(15). 56–59. Часть 2. [http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8–2–15\\_d.pdf](http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8–2–15_d.pdf) [Kulagin V.A. and P'yanyh T.A. Calculation of operating parameters of a supercavitational evaporator [J], *International Research Journal*. 2013. No. 8(15). 56–59. Part 2. [http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8–2–15\\_d.pdf](http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/8–2–15_d.pdf) (in Rus.)].

- [195] Ивченко В.М., Малимон Е.Д. Кинетика кавитационно-пузырьковых суспензий [J], *Прикладная гидромеханика и теплофизика*. Красноярск: КрПИ, 1975. 50–60 [Ivchenko V.M., Malimon E.D. Kinetics of cavitation-bubble suspensions [J], *Applied hydromechanics and thermal physics*. Krasnoyarsk: KrPI, 1975. 50–60 (in Rus.)].
- [196] Кулагина Л.В. Лихачев Д.С. Эрозионные разрушения гидравлического оборудования и их моделирование [J], *Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)*. 2009. 14(6). 44–49 [Kulagina L. V. Likhachev D. S. Erosive destruction of hydraulic equipment and their modeling [J], *Bulletin of the International Academy of Sciences of Ecology and Life Safety (MANEB)*. 2009. V. 14. 6. 44–49 (in Rus.)].
- [197] Kulagina L. V. Computational investigation of flows in tube heat exchangers [J], *Ciepłota Maszyny Przepływowe. Turbomachinery*. Lodz: Academicke Centrum Graficzno-Marketingowe, 2008. 133. 123–129.
- [198] Кулагина Л.В. Моделирование пузырьковых кавитационных потоков [J], *Труды КГТУ*, 2006. 1. 140–145 [Kulagina L. V. Modeling of bubble cavitation flows [J], *Proceedings of KSTU*, 2006. No. 1. 140–145 (in Rus.)].
- [199] Кулагин В.А., Кулагина Л.В., Кулагина Т.А. Использование термомеханических эффектов кавитации в различных технологических процессах [J], *Вестник МАНЭБ*, 2005. 10(4). 154–164 [V. A. Kulagin, L. V. Kulagina, T. A. Kulagina. Use of thermomechanical effects of cavitation in various technological processes [J], *Bulletin of MANEB*, 2005. 10(4). 154–164 (in Rus.)].
- [200] Кашкина Л.В., Кулагин В.А., Стебелева О.П., Кулагина Л.В. Изучение эффектов кавитационного диспергирования твердофазных материалов [J], *Энергетика в глобальном мире: Матер. Междунар. конгресса, НТК «Гидродинамика больших скоростей»*. Красноярск: ИПК СФУ, 2010. 415–417 [Kashkina L. V., Kulagin V. A., Stebeleva O. P., Kulagina L. V. Study of the effects of cavitation dispersion of solid-phase materials [J], *Energy in the global world: Mater. International congress, NTC «Hydrodynamics of high speeds»*. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2010. 415–417 (in Rus.)].