

УДК 532.528

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

Радзюк Александр Юрьевич¹,
aradzyuk@sfu-kras.ru

Истягина Елена Борисовна¹,
eistyagina@sfu-kras.ru

Кулагина Людмила Владимировна¹,
klvation@gmail.com

Жуйков Андрей Владимирович¹,
azhuikov@sfu-kras.ru

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660036, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Актуальность. Известны примеры получения гомогенных жидкостей на основе углей, нефтепродуктов, асбеста, цемента и др. георесурсов с использованием эффектов гидродинамической кавитации. Эффективность кавитационной обработки многофазных сред зависит от множества факторов, таких как тип кавитации (акустическая и гидродинамическая), состав обрабатываемой среды, режим течения, температура, давление, вязкость и многие другие. Разнообразие путей применения кавитационных технологий не позволяет выработать единые подходы к оценке их эффективности, в этой связи актуальность приобретает их сравнение на основе индивидуальных для каждого технологического процесса критериев.

Цель: на основе анализа и обобщения данных о современном состоянии использования кавитационных технологий в теплоэнергетике, химической и нефтяной отраслях производства, атомной энергетике и др. сделать выводы о том, какие из используемых способов кавитационной обработки обладают наибольшей эффективностью в изменении технологических параметров обрабатываемых сред.

Объекты: технологии, устройства и аппараты, в которых при диспергировании, эмульгировании, гомогенизации, очистке и т. д. имеются режимы течения обрабатываемых сред, сопровождающиеся кавитационными явлениями.

Методы: анализ информации о применении кавитационных технологий, приведенной в публикациях за последние пять лет в журналах, проиндексированных в международных базах Web of Science и Scopus.

Результаты. Изложен анализ литературных источников в области использования кавитационных технологий. Приведены основные результаты работ по кавитационной обработке различных жидких композиций, полученные авторами статей. Рассмотрены механизмы кавитационного воздействия, применение кавитационных технологий в различных отраслях, актуальные методы и средства изучения кавитационных явлений. Сделаны выводы об основных достоинствах и недостатках применения кавитационной технологии как элемента технологической обработки. Показано, что наиболее эффективным является воздействие на обрабатываемые среды гидродинамической кавитацией.

Ключевые слова:

Кавитация, интенсификация обработки, смесительные устройства, диспергирование, эмульгирование, гомогенизация.

Введение

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 реакторах. Различают гидродинамическую и акустическую кавитацию. Акустическая кавитация возникает при прохождении через жидкость акустических колебаний, гидродинамическая – за счет местного понижения давления в потоке жидкости при обтекании твердого тела.

Принцип действия гидродинамических кавитационных 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 при дальнейшем разгоне потока объединяются в каверну. Соотношение содержания газа и пара в каверне может быть различным (теоретически от нуля до единицы). В зависимости от концентрации пара или газа в полости их называют паровыми или газовыми. При попадании в область повышенных давлений каверна схлопывается, а выделяющейся в этом процессе энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной каверны.

Механизмы кавитационного воздействия

В последние годы процесс кавитационного воздействия стал широко использоваться для интенсификации многих промышленных производств. Только за последние пять лет в отечественной и зарубежной литературе можно встретить большое число научных публикаций, посвященных применению кавитацион-

ных технологий в различных областях промышленности. 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 [1]. Микропузырьки воздуха, полученные методом гидравлической кавитации с использованием сопла Вентури, рассматриваются в качестве топливной присадки в двигателях внутреннего сгорания [2]. 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 [3] рассматривалась теория кавитационных явлений высокоскоростных струй и разработка эффективного гидродинамического смесителя с минимальным энергопотреблением.

Применение кавитационных технологий в различных отраслях

Производство биодизеля из микроводорослей является одним из решений энергетической проблемы будущего [4]. 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 экстракции. Результаты показали значительное преимущество гидродинамической кавитационной технологии по сравнению с традиционной.

Широко используются кавитационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Так, в работе [5] исследуется влияние древесного угля после кавитации на химические и биохимические свойства почвы. Результаты показали значительное снижение содержания тяжелых металлов в биомассе при использовании кавитированного древесного угля. Установлено, что за счет эффектов пароконденсационной 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 [6]. Этот эффект используется в свёклообработывающей промышленности для повышения чистоты конечного продукта и увеличения его объема производства. В работе [7] представлен механизм оптимизации результатов исследований комплексной системы пере-

работки 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 [8]. 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 [9]. Роторный кавитатор для обработки суспензий с разрушением клеток микроорганизмов и эмульгированием несмешивающихся смесей представлен в работе [10].

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 [11]. Проблемы использования гидродинамической кавитации в нефтегазовой отрасли развиваются в работе [12]. 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 [13] исследуется технология гидродинамической кавитационной обработки вязкой и высоковязкой нефти и возможность ее применения в трубопроводной транспортной системе с целью улучшения реологических свойств, транспортируемой нефти, в том числе динамических вязкостных напряжений сдвига. Использование ультразвуковой кавитации для снижения вязкости тяжелой нефти приведено в работе [14]. В работе [15] показано, что волновая обработка бурового раствора проточными гидродинамическими вихрегенераторами 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 [16].

Разработке новых методов производства композиционных материалов с использованием гидродинамической кавитации посвящена статья [17]. 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.

В работе [18] 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 [19]. Определены временные и физические параметры, при которых ускоряются процессы наноструктурирования.

Кавитационный механизм абляции материала, который обычно имеет место при импульсном лазерном воздействии на твердую мишень, в жидкой среде сказывается на формировании популяции наночастиц металла [20]. Метод получения наночастиц коллоидных сплавов путем импульсной лазерной абляции в жидкостях рассматривается в работе [21]. 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. Гидродинамическая обработка может способствовать улучшению технологических свойств древесины. Изменение её физико-механических свойств при изготовлении древесных плит из опилок рассматривается в работе [22].

Надежности работы технологического оборудования повсеместно уделяется большое внимание. Экспериментально-расчетное исследование нестационарного потока в насосе водометных движителей, выполненное с целью предотвращения явления вращающегося срыва и кавитации и улучшения их конструкции и комплексных характеристик, приводится в работе [23]. Исследования кавитационной эрозии сталей, работающих при высоких гидродинамических нагрузках, приведены в работе [24]. Показано, что азотирование поверхности стали приводит к повышению сопротивления эрозии. Влияние кавитации на работу гидростатического привода исследовалось в работе [25]. Эффект кавитации учитывается в численных полуаналитических исследованиях работы

[26] с целью определения характеристик смазки текстурированного подшипника скольжения. Исследование влияния кавитационной модели для анализа устойчивости работы подшипника скольжения приводится в работе [27]. Модель газовой кавитации используется для изучения влияния на напряжение сдвига и механические потери подшипника в работе [28]. Исследованию проточного химического процесса и его засорению при непрерывной химической обработке посвящена работа [29]. Выявлено, что осаждение твердых частиц вызывается гидродинамической кавитацией. Характеристики вращающейся кавитации, которая может вызвать сильную вибрацию, поломку насоса и потерю работы в турбоустановках, численно рассчитываются в работе [30]. В данной статье представлена модель, предназначенная для оценки устойчивости турбоустановок ракетных двигателей в вязких однофазных средах. На энергетических предприятиях создание высокодисперсных водомазутных эмульсий на основе кавитационной обработки является весьма перспективным [31]. В данной работе 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 [32] исследовано влияние предварительного окисления вакуумного остатка с помощью технологии гидродинамической кавитации на снижения содержания серы в коксе. Среди новых угольных технологий большой интерес представляет сжигание низкосортного угля в виде водоугольного шламового топлива. В статье [33] 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 NO_x и CO_2 . В статье [34] рассматривается кавитационная обработка водоугольных шламов, увеличивающая степень дисперсности угля, и, следовательно, его более эффективное сжигание.

Вопросу повышения качества готового продукта из древесной массы, предварительно обработанной в гидродинамическом диспергаторе, посвящена статья [35]. Вследствие повышения водоудерживающей способности досок, изготовленных из такой массы, их прочность увеличивается.

Всё чаще в последнее время встречается информация об использовании экологически чистого биотоплива. Повышение эффективности его применения является актуальной задачей. В работе [36] 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.

Очистка сточных вод от фенола с помощью технологии гидравлической кавитации рассматривается в работе [37]. 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 [38] представлены результаты исследований по химической очистке стоков от производства битумов нефтяной происхождения. Было изучено несколько процессов усовершенствованного окисления, включая использование гидроксильных и сульфатных радикалов-окислителей, гидродинамическую кавитацию, а также сонокавитацию. 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 [39] 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 [40], где в качестве гидродинамического кавитационного устройства использовалась трубка Вентури. В работе [41] 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 [42].

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 [43]. 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 [44]. 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 [45, 46]. На базе численного моделирования суперкавитационных потоков в испарителе проводится анализ эффективности работы суперкавитатора при различных температурах и скоростях вращения. Исследование влияния на пространственно-временную эволюцию вращательной естественной кавитации, гидродинамические характеристики кавитирующих потоков в ротационном испарителе при различных скоростях вращения с помощью экспериментов по визуализации и трехмерного стационарного численного моделирования было продолжено в работе [44]. Метод термического опреснения морской воды на основе суперкавитации предлагается в работе [47]. 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.

Методы и средства изучения кавитационных явлений

Широкое применение кавитационных разработок сопровождается их аналитическим и экспериментальным изучением. 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 [48], где выявлен диапазон безопасной работы в условиях отсутствия кавитации гидродинамических турбин. Изучение развития (эволюции) кавитации численно проводилось в работе [49] для двумерного подводного крыла NASA, используя модель кавитации с переносом массы и модель k - ϵ . Результаты теоретических исследований процесса гидродинамического измельчения суспензии целлюлозы на основе кавитационных потоков приведены в работе [50], где используется комплексная модель возникновения кавитационного эффекта, основанная на методах математического моделирования.

Использование математических моделей позволяет разработать наиболее оптимальную конструкцию без изготовления прототипов [51]. Моделирование процессов в термочувствительном кавитирующем потоке, возникающем вокруг судна на подводных крыльях, предложено в работах [52, 53]. В работе [54] численными методами выявлены основные закономерности для погружных и непогружных струй, применяемых для разрушения отложений, обладающих высоким сцеплением с поверхностями нефтегазопромыслового оборудования. Численное моделирование течения многофазных потоков выполнялось в программном комплексе для решения задач вычислительной гидродинамики методом конечных элементов. Проведено моделирование течений для трех типов сопел: конического сужения с цилиндрическим выходным отверстием; цилиндрического и конического расходящегося. Полученные результаты подтверждены практическими испытаниями в полевых

условиях. Численному моделированию кавитационного потока посвящены и работы [55–57]. В работе [58] 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 [59], 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 [60]. 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 рассматриваются в работе [61]. С помощью высокоскоростной видеокамеры проведены измерения напорного давления кавитирующей струи, чтобы понять влияние геометрии форсунки на интенсивность агрессивного воздействия. В работе [62] экспериментально исследуется взаимосвязь между условиями работы, геометрией и 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 [63] 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. Характер кавитации (средняя длина прикрепленного облака полости) анализируется на основе результатов экспериментов, проведенных с холодной и горячей водой. В работе [64] 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 эффек-

тивность бурения. Экспериментальные исследования механизма образования и развития кавитации в соплах рассмотрены и описаны в работе [65]. Обобщены различные эмпирические формулы, связывающие коэффициент расхода с гидродинамическими параметрами. Особенности работы колебательно-резонансных кавитаторов по сравнению с гидродинамическими кавитаторами исследуются в работе [66]. Выяснено, что повышение напряженности кавитационного поля, а следовательно, и увеличение производительности кавитационной обработки жидкости обеспечивают именно колебательно-резонансные кавитаторы. Лабораторный стенд для исследования изменения реологических свойств вязкой и высоковязкой нефти при гидродинамической кавитационной обработке приводится в работе [13], 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 [67]. Было показано, что скорость образования пузырьков и их плотность в воде напрямую зависят от давления газа. В статье [68] 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 [68–71], где представлен общий подход к математическому моделированию. Предложенная математическая модель учитывает геометрию, начальные параметры и физические константы, характеризующие процесс.

Заключение

Представленный обзор демонстрирует актуальность использования кавитационных технологий в различных областях науки и техники для решения важных практических задач и, как следствие, продолжения их всестороннего изучения. На основе рассмотренных публикаций можно сделать вывод, что наиболее эффективным для практического применения является гидродинамическая кавитация.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках проекта «Концепция развития теплоэнергетики Красноярского края».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Continuous biodiesel production: a review of advances in catalysis, microfluidic and cavitation reactors / J.A. Okolie, J.I. Escobar, G. Umenweke, W. Khanday, P.U. Okoye // Fuel. – 2022. – V. 307. – № 121821.
2. Performance and emission characteristics of microbubble-enhanced fuels in a diesel engine / E.A. Alias, F.Y. Hagos,

M.I. Ishak, F. Dzaharudin, A.A. Abdullah, A. Asyraf // Energy and Fuels. – 2021. – V. 35 (3). – P. 2630–2638.

3. Spiridonov E.K., Bityutskikh S.Y. Simulation model and characteristics of the cavitation mixer with hydrodynamic grid // Procedia Engineering. – 2016. – V. 150. – P. 210–214.
4. Setyawan M., Mulyono P., Budiman A. Comparison of Nannochloropsis sp. cells disruption between hydrodynamic cavitation

- and conventional extraction // MATEC Web of Conferences. – 2018. – V. 154. – № 01023.
5. Cavitated charcoal – an innovative method for affecting the biochemical properties of soil / K. Gondek, M. Mierzwa-Hersztek, W. Grzymala, T. Głab, T. Bajda // Materials. – 2021. – V. 14 (9). – № 2466.
 6. Zheplinska M., Mushtruk M., Salavor O. Cavitation impact on electrical conductivity in the beet processing industry // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021. – P. 755–762.
 7. Liquid organic waste purification on the example of beet-sugar production using cavitation hydrodynamic generators / V. Mishchenko, A. Semenov, V. Yatsenko, T. Stepanova // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – 1259 AISC. – P. 209–224.
 8. Technical and economic feasibility of a stable yellow natural colorant production from waste lemon peel / R. Ciriminna, B. Forest, F. Meneguzzo, M. Pagliaro, M.T. Hamann // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – V. 10 (19). – № 6812.
 9. Production of high-oleic palm oil nanoemulsions by high-shear homogenization (microfluidization) / L. Ricaurte, M.D.J. Perea-Flores, A. Martinez, M.X. Quintanilla-Carvajal // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2016. – V. 35. – P. 75–85.
 10. Plant and biomass extraction and valorisation under hydrodynamic cavitation / W. Zhilin, F. Daniele, C. Daniele, B.V. Bosco, L. Stevanato // Processes. – 2019. – V. 7 (12). – 965.
 11. Омелянюк М.В., Пахляк И.А. Моделирование истечения затопленных и незатопленных струй // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 12. – С. 124–127.
 12. Омелянюк М.В., Пахляк И.А. Технологические приложения кавитационных струйных течений в нефтегазопромысловом деле // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 130–133.
 13. Application of technology of hydrodynamic cavitation processing high-viscosity oils for the purpose of improving the rheological characteristics of oils / Y.D. Zemenkov, M.Y. Zemenkova, A.A. Vengerov, A.E. Brand // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – 154 (1). – № 012026.
 14. Montes D., Cortés F.B., Franco C.A. Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO₂ nanoparticles // DYNA (Colombia). – 2018. – V. 85 (207). – P. 153–160.
 15. Лабораторные и промышленные исследования волновых машин и аппаратов для приготовления тонкодисперсных суспензий / В.Ю. Артамонов, С.П. Ганиев, Ю.С. Кузнецов, А.П. Пустовгар, Д.Р. Султанов, О.В. Шмырков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 47 (1). – С. 104–111.
 16. Role of mineral flotation technology in improving bitumen extraction from mined Athabasca oil sands. II. Flotation hydrodynamics of water-based oil sand extraction / J.Z. Zhou, H. Li, R.S. Chow, Q. Liu, Z. Xu, J. Masliyah // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2020. – V. 98 (1). – P. 330–352.
 17. Nonequilibrium carbon black suspensions used in synthesis of polymer composite material / O.P. Stebeleva, L.V. Kashkina, E.A. Petrakovskaya, T.V. Rubleva, S.L. Nikitin, O.A. Vshivkova // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1515 (2). – № 022003.
 18. Слизнаева Т.Е., Акулова М.В., Разговоров П.Б. Влияние механомагнитной активации растворов CaCl₂ и Na₂S₂O₃ на фазовый состав цементного камня // Химия и химическая технология. – 2019. – № 62 (12). – С. 101–107.
 19. Krivenko P.V., Guzii S.G., Hela R. The influence of cavitation treatment on nano structuring of alkali aluminosilicate binder for intumescent coatings // Materials Science Forum. – 2017. – 908 MSF. – P. 63–70.
 20. Cavitation-free continuous-wave laser ablation from a solid target to synthesize low-size-dispersed gold nanoparticles / A.O. Kucherik, Y.V. Ryabchikov, S.V. Kutrovskaia, A. Al-Kattan, S.M. Arakelyan, T.E. Itina, A.V. Kabashin // ChemPhysChem. – 2017. – V. 18 (9). – P. 1185–1191.
 21. Limited elemental mixing in nanoparticles generated by ultrashort pulse laser ablation of AgCu bilayer thin films in a liquid environment: atomistic modeling and experiments / C.-Y. Shih, C. Chen, C. Rehbock, A. Tymoczko, U. Wiedwald, M. Kamp, U. Schuermann, L. Kienle, S. Barcikowski, L.V. Zhigilei // Journal of Physical Chemistry. – 2021. – V. 125(3). P. – 2132–2155.
 22. Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N. Mechanical activation of wood for adhesive-free board production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – 155 (1). – № 012038.
 23. Unsteady flow process in mixed waterjet propulsion pumps with nozzle based on computational fluid dynamics / C. Luo, H. Liu, L. Cheng, C. Wang, W. Jiao, D. Zhang // Processes. – 2019. – V. 7 (12). – № 910.
 24. Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel / C. Ghera, I. Mitelea, I. Bordeasu, C. Craciunescu // METAL 2016 – 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. – Brno, 2016. – P. 706–711.
 25. Banyai D., Sfarlea I., Opruta D. Experimental research on variable hydraulic resistors of servo-hydraulic valves // Energy Procedia. – 2016. – V. 85. – P. 44–51.
 26. Lubrication characteristics of a textured porous sliding bearing / S. Lee, D.-Y. Jang, X.Y. Wang, P. Kim, W. Sun, J. Seok // Advances in Mechanical Engineering. – 2015. – V. 7 (3). – P. 1–13.
 27. Miyana N., Tomioka J. Linear and nonlinear stability analysis of hydrodynamic journal bearings using mass-conservative cavitation model // Jurnal Tribologi. – 2019. – V. 22. – P. 61–73.
 28. Ding A., Xiao Y. Numerical investigation for characteristics and oil-air distributions of oil film in a tilting-pad journal bearing // Proceedings of the ASME Turbo Expo. – 2018. – GT2020-15151.
 29. Investigation of a flow step clogging incident: a precautionary note on the use of THF in commercial-scale continuous process / N.R. Rivera, B. Kassim, P. Grigorov, H. Wang, M. Armenante, X. Bu, A. Lekhal, N. Variankaval // Organic Process Research and Development. – 2019. – V. 23 (11). – P. 2556–2561.
 30. Vermes A.G., Lettier C. Source term based modeling of rotating cavitation in turbopumps // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2019. – V. 141 (6). – № 061002.
 31. Review of technologies for treatment of fuel oil during storage and preparation for burning in boiler units / N.A. Furnaces, V.I. Zroychikov, A. Kormilitsyn, V.S. Borozdin, A.V. Pay // Thermal Engineering. – 2020. – V. 67 (2). – P. 106–114.
 32. 降低减压渣油延迟焦化石油焦产品硫含量的研究 / K. Li, H. Chen, J. Lei, D. Zhang, J. Chen, X. Liu, H. Han // Petroleum Processing and Petrochemical. – 2019. – V. 50 (7). – P. 52–57.
 33. The impact of cavitation-activated water on combustion dynamics and environmental characteristics of coal-water slurry fuel / O.P. Stebeleva, L.V. Kashkina, E.A. Petrakovskaya, S.L. Nikitin, T.R. Valiullin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 537 (6). – № 062056.
 34. Мальцева Л.И., Белогурова Т.П., Кравченко И.В. Влияние высокоэнергетического воздействия на физико-технические характеристики угольных топлив // Теплоэнергетика. – 2017. – № 8. – С. 43–49.
 35. Estimating the Effectiveness of Hydrodynamic Treatment of Wood for Producing Wood Boards without Adhesives / V.N. Ermolin, M.A. Bayandin, S.N. Kazitsin, A.V. Namyatov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – 467 (1). – № 012001.
 36. News research & development: biofuel production: bubbles break down biomass. TCE The Chemical Engineer. – 2016. – V. 898. – 21 p.
 37. Study on the degradation of phenol wastewater by the combination of Venturi pipe with orifice plate / Y.-J. Wang, R.-Y. Jin, W.-D. Kong, T.-S. Wang // Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry. – 2017. – V. 37 (4). – P. 160–163.
 38. The effect of firing temperature on the composition and microstructure of a geocement-based binder of sodium water-glass / K. Sotiriadis, S. Guzii, I. Kumpová, P. Mácová, A. Viani // Solid State Phenomena. – 2017. – V. 267 SSP. – P. 58–62.
 39. Practical application of technology combining ozonation with hydrodynamic cavitation to algae removal from water / Z.-L. Wu, W.-M. Wang, W.-X. Li, Y. Zhao, C.-D. Tang, G. Cravotto // Journal of Ecology and Rural Environment. – 2016. – V. 32 (3). – № 1673–4831.
 40. Effect of NaCl and CO₂ on the inception control of hydrodynamic cavitation by gas solubility change / M. Li, R. Manica, B. Xiang, Q. Liu // Chemical Engineering Science. – 2021. – V. 246. – № 116997.
 41. 船舶压载水高级氧化处理技术海域应用效果分析 / X. Zhang, Y. Zhang, Y. Tian, X. Zhang, Z. Zhang, R. Liu // Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering. – 2019. – V. 45 (8). – P. 2681–2688.
 42. Treatment of Tofu industry's wastewater using combination of ozonation and hydrodynamic cavitations method with venturi injector / E.F. Karamah, A.R. Primasto, R.R. Najeges, S. Bismo // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1198 (6). – № 062007.

43. Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape / Z. Zhi-ying, L. Qian, W. Lu, Y. Li-ming, C. Wei-hua, L. Hui, F. Li, L. Feng-chen // Journal of Hydrodynamics. – 2020. – V. 32. – P. 468–485.
44. Spatiotemporal evolution of rotational natural cavitation in rotational supercavitating evaporator for desalination / Z.-Y. Zheng, L. Wang, W.-H. Cai, X. Zheng, Q. Li, T. Kunugi, H. Li, F.-C. Li // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 2020. – V. 142 (5). – № 051205.
45. Numerical simulation research on the optimization for blade shape of rotational supercavitating evaporator / Q. Li, J.P. Cheng, Z.Y. Zheng, F.C. Li, V.A. Kulagin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – 72 (Forum 6). – № 062055.
46. Numerical simulation of the temperature effects on the performance of rotational supercavitating evaporator / Z.Y. Zheng, J.P. Cheng, F.C. Li, M. Zhang, Q. Li, V.A. Kulagin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – 72 (Forum 6). – № 062054.
47. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination / Z.-Y. Zheng, Q. Li, L. Wang, L.-M. Yao, W.-H. Cai, V.A. Kulagin, H. Li, F.-C. Li // Desalination. – 2019. – V. 455. – P. 1–18.
48. Laouari A., Ghenaïet A. Investigation of steady and unsteady cavitating flows through a small Francis turbine // Renewable Energy. – 2021. – V. 172. – P. 841–861.
49. Jin W. Cavitation generation and inhibition. I. Dominant mechanism of turbulent kinetic energy for cavitation evolution // AIP Advances. – 2021. – V. 11 (6). – № 065028.
50. Kuimov D.N., Minkin M.S. Methods for modeling cavitation in pulp fiber grinding processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – 1029 (1). – № 012045.
51. Mathematical basis and validation of the full cavitation model / A.K. Singhal, M.M. Athavale, H. Li, Y. Jiang // J. Fluids Eng. – 2002. – V. 124 (3). – P. 617–624.
52. Evaluation of vorticity forces in thermo-sensitive cavitating flow considering the local compressibility / T. Shen, X. Li, L. Li, Z. Wang, Y. Liu // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2021. – V. 120. – 105008.
53. Numerical investigation of attached cavitating flow in thermo-sensitive fluid with special emphasis on thermal effect and shedding dynamics / Sh. Zhang, X. Li, B. Hu, Y. Liu, Z. Zhu // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44 (5). – P. 3170–3184.
54. Laser cavitation rheology for measurement of elastic moduli and failure strain within hydrogels / J.C. Luo, H. Ching, B.G. Wilson, A. Mohraz, E.L. Botvinick, V. Venugopalan // Scientific Reports. – 2020. – V. 10 (1). – № 13144.
55. Pant C.Sh., Delorme Y., S Frankel. Accuracy assessment of RANS predictions of active flow control for hydrofoil cavitation // Processes. – 2020. – V. 8 (6). – 677.
56. Investigation of rib's effect in cavitation on an axisymmetric separated flow over a longitudinal blunt circular cylinder / H. Izadyar, A.H. Aghababaei, P. Forghani, A. Hajjhasemi // SN Applied Sciences. – 2020. – V. 2 (4). – 588.
57. Kumar A., Ghobadian A., Nouri J.M. Assessment of cavitation models for compressible flows inside a nozzle // Fluids. – 2020. – V. 5 (3). – 134.
58. Hydrodynamic analysis of ultra-high pressure water derusting nozzle / L.-X. Ni, Z.-S. Chen, Z. Liu, X.-F. Feng // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. – Virtual, Online, 2020. – P. 1842–1850.
59. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения / А.Ю. Радзюк, В.А. Кулагин, Е.Б. Истягина, Т.А. Пьяных // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технология. – 2019. – Т. 12 (4). – С. 468–475.
60. Numerical investigation on the regime of cavitation shedding and collapse during the water-exit of submerged projectile / Y. Chen, Z. Gong, J. Li, X. Chen, C. Lu // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 2020. – V. 142 (1). – № 011403.
61. Kamisaka H., Soyama H. Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by introducing water flow holes and a long guide pipe // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 2021. – V. 143 (3). – № 031201.
62. 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 // Thermal Science. – 2020. – V. 24 (1 Part A). – P. 407–419.
63. Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics / H. Zhang, Z. Zuo, K.A. Mørch, S. Liu // Physics of Fluids. – 2019. – V. 31 (9). – № 097107.
64. Ганиев С.П., Кузнецов Ю.С., Шмырков О.В. Нелинейные волновые и кавитационные процессы и их влияние на механические свойства вязких растворов // Доклады академии наук. – 2019. – Т. 484. – № 4. – С. 410–414.
65. Sun Y., Guan Z., Hooman K. Cavitation in diesel fuel injector nozzles and its influence on atomization and spray // Chemical Engineering and Technology. – 2019. – V. 42 (1). – P. 6–29.
66. Electromagnetic vibratory cavitator / I.S. Aftanaziv, L.I. Shevchuk, I.Z. Koval, L.R. Strutynska, O.I. Strogan, A. Smolarz, A. Ormanbekova, K. Begaliyeva // Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – V. 95 (4). – P. 24–29.
67. Generation of submicron bubbles using Venturi tube method / I.G.P. Wiraputra, D. Edikresnha, M.M. Munir, A.E. Khairurrijal // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 739 (1). – № 012058.
68. Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand / A.Yu. Radzyuk, V.A. Kulagin, E.B. Istyagina, T.A. Pinykh, M.V. Kolosov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 537 (4). – 042080.
69. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow / A.Yu. Radzyuk, V.A. Kulagin, E.B. Istyagina, T.A. Pinykh, M.V. Kolosov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 315. – I. 3.
70. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench / A.Yu. Radzyuk, V.A. Kulagin, E.B. Istyagina, T.A. Pinykh, I.I. Grishina // Journal of Physics: Conference Series. Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019: International Scientific Conference. – Krasnoyarsk, Russia, 2019. – P. 22050.
71. Verification of the results of numerical modeling of the developed cavitation in a cramped flow by experimental data / A.Yu. Radzyuk, E.B. Istyagina, T.A. Pinykh, M.P. Baranova, I.I. Grishina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 734 (1). – 12192.

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Радзюк А.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Сибирского федерального университета.

Истягина Е.Б., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Сибирского федерального университета.

Кулагина Л.В., кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной и экологической безопасности Сибирского федерального университета.

Жуйков А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Сибирского федерального университета.

UDC 532.528

CURRENT STATE OF USING CAVITATION TECHNOLOGIES (BRIEF OVERVIEW)**Alexander Yu. Radzyuk¹,**
aradzyuk@sfu-kras.ru**Elena B. Istyagina¹,**
eistyagina@sfu-kras.ru**Ludmila V. Kulagina¹,**
klvation@gmail.com**Andrey V. Zhukov¹,**
azhukov@sfu-kras.ru¹ Siberian Federal University,
79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660036, Russia.

The relevance. There are known examples of obtaining homogeneous fluids based on coals, petroleum products, asbestos, cement and other georesources using the effects of hydrodynamic cavitation. The efficiency of cavitation treatment of multiphase media depends on many factors, such as the type of cavitation (acoustic and hydrodynamic), the composition of the treated medium, flow regime, temperature, pressure, viscosity and many others. A variety of ways of application of cavitation technologies does not allow developing unified approaches to assessment of their efficiency, in this regard, their comparison on the basis of individual criteria for each technological process acquires relevance.

The main aim of the research is to make conclusions about which of the used methods of cavitation treatment have the greatest efficiency in changing the technological parameters of the processed media on the basis of the analysis and summaries of the current state of using cavitation technologies in thermal power engineering, chemical and oil industries, nuclear power, etc.

Objects: technologies, devices and apparatuses in which during dispersion, emulsification, homogenization, purification, etc., there are modes of flow of treated media accompanied by cavitation phenomena.

Methods: analysis of information on the application of cavitation technologies given in publications over the past five years in journals indexed in the international databases Web of Science and Scopus.

Results. The paper introduces the analysis of literary sources in the field of cavitation technologies. The main results of works on cavitation treatment of various liquid compositions obtained by the authors of the articles are presented. Mechanisms of cavitation influence, application of cavitation technologies in various branches, actual methods and means of studying cavitation phenomena are considered. Conclusions about the main advantages and disadvantages of using cavitation technology as an element of technological processing are made. It is shown that the most effective is the impact on the processed media by hydrodynamic cavitation.

Key words:

Cavitation, processing intensification, mixing devices, dispersion, emulsification, homogenization.

The research was financially supported by the Krasnoyarsk Krai Government, Krasnoyarsk Krai Foundation for Support of Scientific and Technical Activities (Project no. 2022031008477).

REFERENCES

- Okolie J.A., Escobar I.J., Umenweke G., Khanday W., Okoye P.U. Continuous biodiesel production: a review of advances in catalysis, microfluidic and cavitation reactors. *Fuel*, 2022, vol. 307, no. 121821. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121821
- Alias E.A., Hagos F.Y., Ishak M.I., Dzaharudin F., Abdullah A.A., Asyraf A. Performance and Emission characteristics of microbubble-enhanced fuels in a diesel engine. *Energy and Fuels*, 2021, vol. 35 (3), pp. 2630–2638. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03204
- Spiridonov E.K., Bityutskikh S.Y. Simulation model and characteristics of the cavitation mixer with hydrodynamic grid. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 210–214. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.748
- Setyawan M., Mulyono P., Sutijan Budiman A. Comparison of Nannochloropsis sp. cells disruption between hydrodynamic cavitation and conventional extraction. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 154, no. 01023. DOI: 10.1051/mateconf/201815401023
- Gondek K., Mierzwa-Hersztek M., Grzymała W., Głab T., Bajda T. Cavitated charcoal – an innovative method for affecting the biochemical properties of soil. *Materials*, 2021, vol. 14 (9), no. 2466. DOI: 10.3390/ma14092466
- Zheplinska M., Mushtruk M., Salavor O. Cavitation impact on electrical conductivity in the beet processing industry. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 755–762. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_73
- Mishchenko V., Semenov A., Yatsenko V., Stepanova T. Liquid organic waste purification on the example of beet-sugar production using cavitation hydrodynamic generators. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, 1259 AISC, pp. 209–224. DOI: 10.1007/978-3-030-57453-6_18
- 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. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, vol. 10 (19), no. 6812. DOI: 10.3390/app10196812
- 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). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, vol. 35, pp. 75–85. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.04.004
- Zhilin Wu, Ferreira D.F., Crudo D., Bosco V., Stevanato L., Costale A., Cravotto G. Plant and Biomass Extraction and Valorisation under Hydrodynamic Cavitation. *Processes*, 2019, vol. 7 (12), 965. DOI: Doi.org/10.3390/pr7120965
- Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I.A. Simulation of flooded and unflooded jets for improving technology of high-pressure purification of oil and gas field equipment. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil In-*

- dustry, 2020, vol. 2020 (12), pp. 124–127. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-12-124-127
12. Omelyanyuk M.V., Pakhlyan I.A. Technological application of cavitating jet streams in the oil and gas industry. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2019 (11), vol. 12, pp. 130–133. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-11-130-133. In Rus.
 13. 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. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 154 (1), no. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012026.
 14. Montes D., Cortés F.B., Franco C.A. Reduction of heavy oil viscosity through ultrasound cavitation assisted by NiO nanocrystals-functionalized SiO₂ nanoparticles. *DYNA (Colombia)*, 2018, vol. 85 (207), pp. 153–160. DOI: 10.15446/dyna.v85n207.71804
 15. 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. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47 (1), pp. 104–111. DOI: 10.3103/S1052618818010028
 16. 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. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, vol. 98 (1), pp. 330–352. DOI: 10.1002/cjce.23598.
 17. 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. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1515 (2), no. 022003. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/2/022003
 18. Slizneva T.E., Akulova M.V., Razgovorov P.B. Influence of mechano-magnetic activation of solutions CaCl₂ and Na₂S₂O₃ on phase structure of cement stone. *ChemChemTech*, 2019, vol. 62 (12), pp. 101–107. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114
 19. Krivenko P.V., Guzii S.G., Hela R. The influence of cavitation treatment on nano structuring of alkali aluminosilicate binder for intumescent coatings. *Materials Science Forum*, 2017, 908 MSF, pp. 63–70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.908.63.
 20. 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. *ChemPhysChem*, 2017, vol. 18 (9), pp. 1185–1191. DOI: 10.1002/cphc.201601419
 21. 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. *Journal of Physical Chemistry*, 2021, pp. 1185–1191. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c09970
 22. Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N. Mechanical activation of wood for adhesive-free board production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 155 (1), no. 012038. DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012038
 23. 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. *Processes*, 2019, vol. 7 (12), no. 910. DOI: 10.3390/PR7120910
 24. Ghera C., Mitelea I., Bordeasă I., Crăciunescu C. Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel. *METAL 2016 – 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials. Conference Proceedings*. Brno, 2016. pp. 706–711.
 25. Banyai D., Sfarlea I., Opruta D. Experimental research on variable hydraulic resistors of servo-hydraulic valves. *Energy Procedia*, 2016, vol. 85, pp. 44–51. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.273
 26. Lee S., Jang D.-Y., Wang X.Y., Kim P., Sun W., Seok J. Lubrication characteristics of a textured porous sliding bearing. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 7 (3), pp. 1–13. DOI: 10.1177/1687814015573618
 27. Miyanaga N., Tomioka J. Linear and nonlinear stability analysis of hydrodynamic journal bearings using mass-conservative cavitation model. *Journal Tribology*, 2019, vol. 22, pp. 61–73.
 28. Ding A., Xiao Y. Numerical investigation for characteristics and oil-air distributions of oil film in a tilting-pad journal bearing. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2018, 7B-2018. DOI: 10.1115/GT2018-75888
 29. 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. *Organic Process Research and Development*, 2019, vol. 23 (11), pp. 2556–2561. DOI: 10.1021/acs.oprd.9b00366
 30. Vermes A.G., Lettieri C. Source term based modeling of rotating cavitation in turbopumps. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, vol. 141 (6), no. 061002. DOI: 10.1115/1.4042302
 31. 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. *Thermal Engineering*, 2020, vol. 67 (2), pp. 106–114. DOI: 10.1134/S0040601520020068
 32. 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. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2019, 50 (7), pp. 52–57. In Chinese.
 33. 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. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 537 (6), no. 062056. DOI: 10.1088/1757-899X/537/6/062056
 34. Maltsev L.I., Belogurova T.P., Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, pp. 585–590. DOI: Doi.org/10.1134/S0040601517080067
 35. Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Estimating the Effectiveness of Hydrodynamic Treatment of Wood for Producing Wood Boards without Adhesives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 467 (1), no. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/467/1/012001.
 36. News research & development: Biofuel production: Bubbles break down biomass. *TCE The Chemical Engineer*, 2016, (898), 21 p.
 37. 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. *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry*, 2017, vol. 37 (4), pp. 160–163. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.04.039
 38. Sotiriadis K., Guzii S., Kumpová I., Mácová P., Viani A. The effect of firing temperature on the composition and microstructure of a geocement-based binder of sodium water-glass. *Solid State Phenomena*, 2017, 267 SSP, pp. 58–62. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.58
 39. 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. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, vol. 32 (3), no. 1673-4831 (2016)03-0500-07, pp. 500–506. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.03.025
 40. Li M., Manica R., Xiang B., Liu Q. Effect of NaCl and CO₂ on the inception control of hydrodynamic cavitation by gas solubility change. *Chemical Engineering Science*, 2021, vol. 246, no. 116997. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116997
 41. 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. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 2019, 45 (8), pp. 2681–2688. In Chinese. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180619007
 42. 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. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1198 (6), no. 062007. DOI: 10.1088/1742-6596/1198/6/062007
 43. 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. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, vol. 32, pp. 468–485
 44. 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. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2020, vol. 142 (5), no. 051205. DOI: 10.1115/1.4045612
45. 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. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 72 (Forum 6), no. 062055. DOI: 10.1088/1757-899X/72/6/062055
 46. 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. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 72 (Forum 6), no. 062054. DOI: 10.1088/1757-899X/72/6/062054
 47. Zheng Z.-Y., Li Q., Wang L., Yao L.-M., Cai W.-H., Kulagin V.A., Li H., Li F.-C. Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination. *Desalination*, 2019, vol. 455, pp. 1–18
 48. Laouari A., Ghenaïet A. Investigation of steady and unsteady cavitating flows through a small Francis turbine. *Renewable Energy*, 2021, vol. 172, pp. 841–861. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.080
 49. Jin W. Cavitation generation and inhibition. I. Dominant mechanism of turbulent kinetic energy for cavitation evolution. *AIP Advances*, 2021, vol. 11 (6), no. 065028, DOI: 10.1063/5.0050231
 50. Kuimov D.N., Minkin M.S. Methods for modeling cavitation in pulp fiber grinding processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1029 (1), no. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012045
 51. Ashok K. Singhal, Mahesh M. Athavale, Huiying Li, Yu Jiang. Mathematical basis and validation of the full cavitation model. *J. Fluids Eng.*, 2002, vol. 124 (3), pp. 617–624. DOI: Doi.org/10.1115/1.1486223
 52. Shen T., Li X., Li L., Wang Z., Liu Y. Evaluation of vorticity forces in thermo-sensitive cavitating flow considering the local compressibility. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 120, 105008.
 53. 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. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 5, pp. 3170–3184.
 54. 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. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10 (1), no. 13144. DOI: 10.1038/s41598-020-68621-y
 55. Pant Ch.Sh., Delorme Y., Frankel S. Accuracy assessment of RANS predictions of active flow control for hydrofoil cavitation. *Processes*, 2020, vol. 8 (6), 677. DOI: Doi.org/10.3390/pr8060677
 56. Izadyar H., Aghababaei A.H., Forghani P., Hajjighasemi A. Investigation of rib's effect in cavitation on an axisymmetric separated flow over a longitudinal blunt circular cylinder. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, no. 4, 588.
 57. Aishvarya K., Ali G., Jamshid M.N. Assessment of cavitation models for compressible flows inside a nozzle. *Fluids*, 2020, vol. 5 (3), 134. DOI: Doi.org/10.3390/fluids5030134
 58. Ni L.-X., Chen Z.-S., Liu Z., Feng X.-F. Hydrodynamic analysis of ultra-high pressure water derusting nozzle. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. Virtual, Online, 2020, pp. 1842–1850.
 59. 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. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2019, vol. 12 (4), pp. 468–475. In Rus.
 60. 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. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2020, vol. 142 (1), no. 011403. DOI: 10.1115/1.4044831
 61. Kamisaka H., Soyama H. Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by introducing water flow holes and a long guide pipe. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2021, vol. 143 (3), no. 031201. DOI: 10.1115/1.4048683
 62. 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. *Thermal Science*, 2020, vol. 24 (1 Part A), pp. 407–419. DOI: 10.2298/TSCI190428334H
 63. Zhang H., Zuo Z., Mørch K.A., Liu S. Thermodynamic effects on Venturi cavitation characteristics. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31 (9), no. 097107. DOI: 10.1063/1.5116156
 64. Ganiev S.R., Kuznetsov Y.S., Shmyrkov O.V. Nonlinear wave and cavitation processes and their effect on the mechanical properties of viscous solutions. *Doklady Physics*, 2019, vol. 64 (2), pp. 49–52. DOI: 10.1134/S1028335819020010
 65. Sun Y., Guan Z., Hooman K. Cavitation in diesel fuel injector nozzles and its influence on atomization and spray. *Chemical Engineering and Technology*, 2019, vol. 42 (1), pp. 6–29. DOI: 10.1002/ceat.201800323.
 66. Aftanaziv I.S., Shevchuk L.I., Koval I.Z., Strutyńska L.R., Strogan O.I., Smolarz A., Ormanbekova A., Begaliyeva K. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, vol. 95 (4), pp. 24–29. DOI: 10.15199/48.2019.04.05
 67. Wiraputra I.G.P.A.E., Edikresnha D., Munir M.M., Khairurrijal. Generation of Submicron Bubbles using Venturi Tube Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 739 (1), no. 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/739/1/012058
 68. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pinykh T.A., Kolosov M.V. Determination of the flow regime using the experimental hydrodynamic stand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 537 (4), DOI: 10.1088/1757-899X/537/4/042080
 69. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pinykh T.A., Kolosov M.V. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 315 (3), 032027. DOI: 10.1088/1755-1315/315/3/032027
 70. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pinykh T.A., Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench. *Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference. Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019*. Krasnoyarsk, Russia, 2019. p. 22050. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/2/022050
 71. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Pinykh 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. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, p. 12192. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012192

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

Alexander Yu. Radzyuk, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Elena B. Istyagina, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Ludmila V. Kulagina, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Andrey V. Zhuikov, Cand Sc., associate professor, Siberian Federal University.