

УДК 620.179

Перспективы и возможности ультраструйного метода диагностики материалов

М.А. Янко

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Prospects and possibilities of the ultra-jet diagnostics' method

M.A. Yanko

Bauman Moscow State Technical University

Исследованы особенности применения ультраструйных гидротехнологий для диагностики деталей и материалов. Выполнены обзор исследований по реализации ультраструйных гидротехнологий и анализ полученных с их помощью результатов. В основу литературного обзора легли материалы диссертационных работ с глубиной поиска до пятнадцати лет. Рассмотрены как решенные, так и перспективные задачи по использованию ультраструйных гидротехнологий в качестве метода диагностики в машиностроении. Показано, что ультраструйная диагностика имеет инновационный потенциал.

EDN: VLTAKE, <https://elibrary/vltake>**Ключевые слова:** ультраструйная диагностика, ультраструйные гидротехнологии, гидроабразивное резание, гидроструйное воздействие, гидроэрозионное разрушение

Ultra-jet hydrotechnologies application for the diagnostics process implementation of parts and materials is considered. A review of studies related to implementation of ultra-jet hydrotechnologies and an analysis of the results obtained with their help are conducted. The literature review is based on the dissertations materials with a search depth of up to fifteen years. Both solved and promising problems of the application of ultra-jet hydrotechnologies as a diagnostic method in mechanical engineering are considered. It is proven that ultra-jet diagnostics has innovative potential.

EDN: VLTAKE, <https://elibrary/vltake>**Keywords:** ultra-jet diagnostics, ultra-jet hydrotechnology, hydroabrasive cutting, hydro-impact, hydroerosive destruction

Ультраструйные гидротехнологии (УСТ) включают в себя группу методов и средств создания высокоскоростной струи жидкости, которые при взаимодействии с мишенью приводят к целенаправленным изменениям в полученной жидкости или зоне контакта с материалом мишени [1]. УСТ основаны на преобразовании работы гидрооборудования в кинетическую энергию струи и ее компактирования с помощью струеформирующей фокусирующей трубки [1, 2]. На основе этого принципа построены

станки для гидро- и гидроабразивного резания: рабочая жидкость сначала сжимается под сверхвысоким давлением (150...400 МПа), а затем продавливается через специальное сопло малого диаметра (около 0,1 мм). На выходе из фокусирующей трубки формируется компактная высокоскоростная (400...600 м/с) струя жидкости, движущаяся со сверхзвуковой скоростью.

Благодаря преимуществам УСТ перед другими технологиями ее применяют для решения

многих производственных задач, прежде всего для резания материалов: композиционных, алюминий-магниевого сплава, многослойных пакетов, бронестекла, резины и др. Кроме того, по критерию пожаро- и взрывобезопасности у УСТ нет конкурентных технологий при выполнении работ по фрагментации и утилизации конструкций (таких как топливные баки и резервуары с топливом), в которых могут присутствовать остаточные пары топлива.

Анализ результатов исследований, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, по реализации инновационных УСТ, показал многообразие их приложений и высокий потенциал дальнейшего развития [3–7].

Одним из самых перспективных направлений научно-практической реализации УСТ является применение ультразвука в качестве инструмента для диагностирования изделий с целью получения информации о физико-механических и эксплуатационных свойствах поверхностного слоя их материалов. Сравнивая параметры результата воздействия (степень пластической деформации поверхностного слоя, продукты гидроэрозии) исследуемого образца с таковыми эталона, обладающего известными свойствами, можно судить о свойствах образца. Изменяя параметры режима воздействия струи на поверхность (угол падения и скорость движения струи, расстояние до мишени) и/или меняя ее состав, например, добавляя в нее полимерные или ледяные частицы, можно создать различные условия диагностики, приближенные к реальным условиям эксплуатации.

Таким образом, под ультразвуковой диагностикой (УСД) будем понимать получение информации о состоянии объекта исследования на основании характеристик гидроэрозионного разрушения его поверхности с помощью воздействия на нее ультразвуковой жидкости.

Цель работы — обзор информационных источников по УСД.

Аппарат УСД. Классический алгоритм УСД включает в себя следующие шаги [1]:

- гидроструйное воздействие на диагностируемую поверхность, вызывающее ее гидроэрозию при определенных условиях (таких как рабочее давление и диаметр струи, кинематика движения и др.);

- исследование и сравнение параметров гидроэрозии (размера частиц материала, структу-

ры материала в зоне резания, глубины резания и др.) с эталонными характеристиками или между собой на разных участках поверхности;

- оценка качества контролируемого участка поверхности и текущего состояния в целом по полученной разнице результатов сравнения (абсолютных или относительных).

Примечательно, что рассматриваемый вид диагностики оказывает локальное воздействие на объект контроля и в ряде случаев может не приводить к существенным изменениям эксплуатационных и физико-механических свойств [1]. Устранить результаты воздействия можно, например, с помощью дополнительной технологической обработки. В целом же метод ориентирован на использование образцов-свидетелей на этапах технологической подготовки производства.

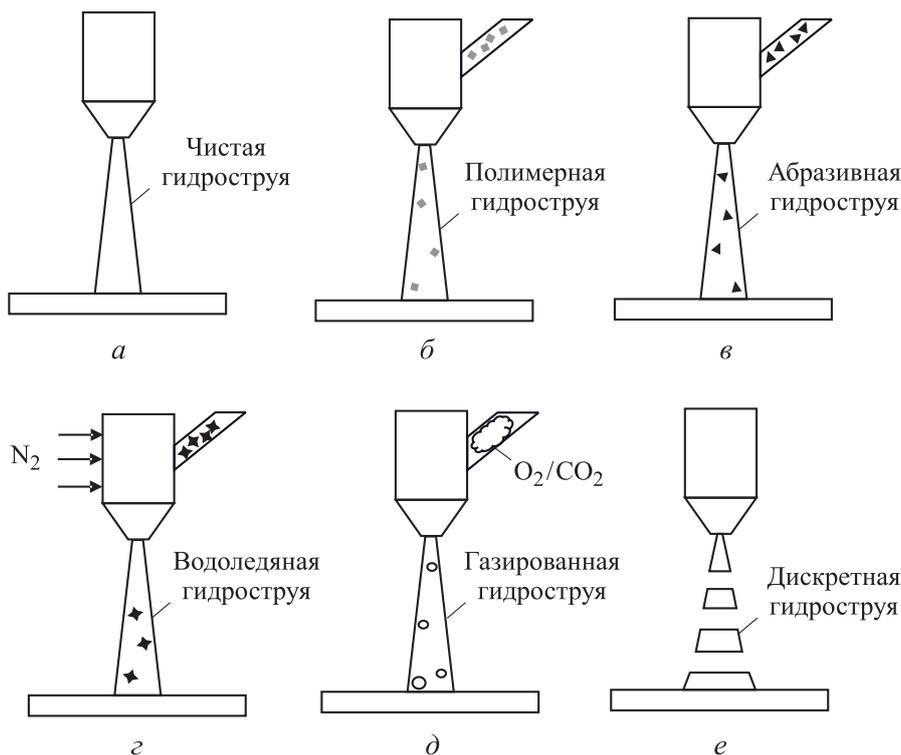
По результатам анализа литературных источников, посвященных методам УСД, сформирована классификация существующих и перспективных методов диагностики высоконапорной струей жидкости (см. рисунок).

Гидроструйная диагностика. Гидроструйная диагностика, как частный случай УСД, является самым простым видом диагностики с точки зрения практической реализации, так как для ее проведения необходима только техническая жидкость (вода) без каких-либо добавок. Гидроструйная диагностика подробно изучена и описана М.И. Абашиным [8–12], исследовавшим процесс диагностирования металлов, сплавов и керамики, а также А.С. Проваторовым при разработке экспресс-методики определения эксплуатационно-технологических характеристик покрытий с помощью гидроструи [13–17].

По экспериментальным результатам гидроструйной диагностики [12] М.И. Абашиным получены корреляционные зависимости между такими характеристиками металла, как твердость и параметры гидроэрозии поверхности объекта контроля.

В работах А.С. Проваторова предложены новые методы диагностики функциональных тонкопленочных покрытий, наносимых с помощью ионно-плазменного осаждения с использованием дуговых установок [18, 19], и оценки качества деталей с износостойкими наноструктурированными покрытиями [15].

В публикациях [20–22] показано, что по полученным в результате гидроструйной диагностики информативным параметрам можно



Схемы применения существующих и перспективных методов УСД в машиностроении:

a — диагностика чистой струей воды; *б* — диагностика водополимерной струей;

в — гидроабразивная диагностика; *г* — водоледная диагностика,

д — диагностика газосодержащей газированной гидроструей;

е — дискретная ультразвуковая диагностика

определить качество и ресурс изделий с покрытиями.

Ультразвуковая диагностика с помощью акустической эмиссии. Другим подвидом УСД является комбинированный метод диагностики, сочетающий в себе ультразвуковое воздействие на объект с одновременной записью параметров акустической эмиссии в нем. Данные акустической эмиссии позволяют сделать рациональный выбор режима гидроабразивного воздействия благодаря корреляционным зависимостям между производительностью обработки и мощностью акустического излучения.

Эта же особенность обнаружена и экспериментально доказана М.В. Хафизовым [20, 23–25]. Благодаря данным акустической эмиссии в сочетании с массовыми и геометрическими параметрами гидрокаверны можно объективно оценить качественные и эксплуатационные свойства материала. Метод акустической эмиссии позволяет зафиксировать уровень сигнала при возникновении/распространении волн упругих колебаний.

Исследования взаимосвязи акустической эмиссии и информативных параметров УСД [25] показали возможность получения количественной оценки результата обработки. В работе [23] приведены рекомендации по использованию метода акустической эмиссии для определения оптимальной концентрации абразива в гидроабразивной струе при обработке деталей машиностроения из различных материалов (сталей, керамики, полимеров, композиционных материалов и т. д.).

Ультразвуковая полимерная диагностика. Вопросы утилизации полимерных композиционных материалов в сочетании с ростом отходов из них являются крайне актуальными. Переработка полимерных композиционных материалов требует предварительного измельчения с помощью роторных дробилок и специального инструмента — ножей. Технология производства ножей имеет особенности, связанные с выбором режимов закалки и охлаждения, а также применения различных материалов и методов получения заготовок.

В этом случае УСД с использованием полимерных добавок может служить инструментом для экспресс-оценки параметров износостойкости материала ножей и определения его ресурса. Ультраструйное воздействие можно рассматривать как имитационное средство диагностики.

Кроме того, такой метод УСД позволяет использовать порошок разного состава, приближенный по свойствам и характеристикам к материалам, требующим измельчения.

Сюеянь Ли установил, что эксплуатационные и физико-механические свойства режущего инструмента имеют высокую связь с результатами УСД с применением водополимерной струи жидкости [26–29].

Ультраструйная водоледевая диагностика.

Изделия, эксплуатируемые в условиях Крайнего Севера (такие, как гребные винты и корпуса судов), подвергаются воздействию не только отрицательной температуры, но и абразивных ледяных частиц, способствующих абразивному изнашиванию поверхности. УСД как универсальный метод позволяет создавать многокомпонентные ультраструи — водоледевые струи с использованием жидкого азота в качестве добавки к воде. Применение водоледевых струй — это не только решение вопросов имитационной диагностики, но и повышение производительности гидрорезания. Известно, что абразивный материал достаточно дорогостоящий, что влияет на себестоимость такой обработки. Использование в качестве альтернативы микрочастиц льда позволит повысить производительность резания и отказаться от применения абразива.

Н.А. Изотовым проведены исследования по захолаживанию жидкости с помощью специальных технологических устройств, применяемых совместно с гидроструйным оборудованием [30–32].

М.А. Бурнашов теоретически и экспериментально доказал эффективность резания листовых неметаллических материалов водоледевыми струями высокого давления с учетом выбора рациональных параметров процесса обработки [33].

Применение водоледевого резания открывает возможности для решения задач в смежных областях: при разрезке продуктов питания на пищевых производствах, в мясопереработке, медицине и др.

Ультраструйная диагностика с пульсирующими и кавитирующими струями. В работе Сюеянь Ли [29] методом математического моделирования доказано, что при добавлении в высокоскоростную струю жидкости твердых полимерных частиц в результате их взаимодействия с водой по направлению движения за ними образуются полости газа.

Явление кавитации высокоскоростной струи обнаружено расчетным путем при моделировании движения двухфазной системы жидкость — абразив в диапазоне скоростей 600...900 м/с [34–38].

Обнаруженные явления и изучение механизмов кавитации [39–42] при использовании кавитирующих или пульсирующих струй позволили говорить о решении задач не только повышения качества резания, но и увеличения ресурса режущей головки. Однако использование струй такого типа для диагностики пока остается малоизученным из-за отсутствия достаточной экспериментальной базы.

Тем не менее, Н.А. Прохоровым выполнен анализ существующих способов создания пульсирующих и кавитирующих жидкостных струй, предварительно оценена их эффективность и возможность применения при гидрорезании металлических конструкций [43].

Ультраструйная абразивная диагностика.

Такая обработка основана на классическом методе гидроструйной диагностики и отличается от него только тем, что в струю жидкости для диагностирования добавляются твердые частицы абразива. Такое сочетание компонентов диагностической жидкости обеспечивает имитацию эксплуатационных условий некоторых изделий, например, почвообрабатывающих органов машин, работающих в абразивной среде [44]. Кроме того, для улучшения плодородия почв целенаправленно применяют различные добавки, например, минеральные и органические удобрения, благодаря чему увеличивается агрессивность воздействия обрабатываемой почвы на контактирующие с ней рабочие органы почвообрабатывающих машин. Такие добавки увеличивают степень и интенсивность коррозии, что наносит существенный урон контактирующим с почвой деталям машин.

Эксплуатационные свойства рабочих органов машин, в том числе износостойкость, можно прогнозировать с помощью методов УСД путем варьирования состава используемого

абразива и введения агрессивных водорастворимых добавок, имитирующих условия эксплуатации оборудования. Поэтому разработка нового метода диагностики износостойкости поверхностного материала почвообрабатывающих органов машин является актуальной задачей.

Вывод

Перспективной областью применения УСТ, помимо традиционных решаемых этой техно-

логией задач обработки и очистки материалов, является создание новых направлений УСД и контроля качества изделий на всех этапах их жизненного цикла. Многочисленные публикации, в том числе наличие патентов на различные виды УСД за последние 10 лет подтверждают актуальность данного исследования и доказывают полифункциональность возможностей УСТ, что определяет их инновационный потенциал.

Литература

- [1] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л. и др. *Ультразвуковая мезодиагностика*. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 250 с.
- [2] Барзов А.А., Беккиев А.Ю., Бочкарев С.В. и др. *Диагностика и прогнозирование качества инноваций (на примере ультразвуковых гидрофизических технологий)*. Старый Оскол, ТНТ, 2019. 328 с.
- [3] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Голубев Е.С. и др. Ультразвуковая диагностика структурно-анизотропных особенностей деталей, изготовленных методом селективного лазерного плавления. *Электromеталлургия*, 2021, № 2, с. 13–21. EDN IHAVRQ
- [4] Галиновский А.Л., Папич А., Ерохин С.А. и др. Оценка возможности расширения потенциала метода ультразвуковой диагностики композиционных материалов. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2021, № 3, с. 34–40. EDN JKLIEX
- [5] Галиновский А.Л., Михайлов А.А., Вышегородцева А.С. и др. Разработка модели генерации точек взаимодействия образца с абразивными частицами при оценке эрозивной стойкости лакокрасочных покрытий. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2024, № 1, с. 19–25. EDN: UBMYGL
- [6] Галиновский А.Л., Ковалева Д.Э., Плохих А.И. и др. Ультразвуковая диагностика повреждений углепластиковых панелей в результате термоциклического воздействия. *Справочник. Инженерный журнал*, 2023, № 8, с. 3–10, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2023.08.pp.003-010>
- [7] Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Нелюб В.А. *Технологии производства и диагностики композитных конструкций летательных аппаратов*. Старый Оскол, ТНТ, 2019. 384 с.
- [8] Абашин М.И. *Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий*. Москва, Спектр, 2012. 337 с.
- [9] Ли С., Галиновский А.Л., Абашин М.И. и др. Ультразвуковой метод оценки эксплуатационных свойств биметаллического инструмента. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2019, № 11, с. 14–20, doi: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-11-14-20>
- [10] Кубагушев Б.Н., Абашин М.И. Анализ возможностей применения ультразвукового гидродиагностирования для обеспечения промышленной безопасности. *Новые подходы и технологии проектирования, производства, испытаний и промышленного дизайна изделий ракетно-космической техники. Сб. тр. II Межд. молод. конф.* Москва, Диона, 2018, с. 250–255. EDN: VVBKXN
- [11] Абашин М.И., Барзов А.А., Бочкарев С.В. и др. Применение ультразвуковой диагностики для оценки качества сварных швов. *Сварочное производство*, 2014, № 9, с. 26–29. EDN: SQLQYT
- [12] Абашин М.И. *Ускоренное определение параметров качества поверхностного слоя материала изделий по результатам воздействия на него сверхзвуковой струи жидкости*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 152 с.
- [13] Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Петровичев А.Б. и др. *Способ контроля и диагностики устойчивости покрытия к действию внешних нагрузок*. Патент РФ 2583332. Заявл. 12.01.2015, опублик. 10.05.2016.

- [14] Галиновский А.Л., Проваторов А.С. Определение эксплуатационно-технологических характеристик наноструктурированных покрытий по результатам воздействия на них высокоскоростной гидроструи. *Ключевые тренды в композитах: наука и технологии. Сб. мат. межд. науч.-практ. конф.* Москва, Диона, 2019, с. 137–141. EDN: UGCQBY
- [15] Проваторов А.С., Галиновский А.Л. Ускоренное определение эксплуатационно-технологических характеристик деталей с наноструктурированными покрытиями по результатам воздействия на них высокоскоростной гидроструи. *Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники. Сб. тр. Межд. молодеж. науч.-тех. конф.* Москва, Диона, 2017, с. 16–18. EDN: YQRUUG
- [16] Абашин М.И., Хафизов М.В., Проваторов А.С. Разработка методики ультразвуковой диагностики эксплуатационно-технологических характеристик поверхностного слоя материала изделий РКТ. *Молодежный научно-технический вестник*, 2012, № 10. EDN: PONWCSN
- [17] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Моисеев В.А. и др. К вопросу разработки научно-методической базы получения и диагностики наноструктурных покрытий. *Наноинженерия*, 2014, № 5, с. 23–27. EDN: SJXQAX
- [18] Ткачев А.Г., Галиновский А.Л., Барзов А.А. и др. *Способ обработки неоднородных гидросред (жидкостей)*. Патент РФ 2767096. Заявл. 15.07.2020, опубл. 16.03.2022.
- [19] Галиновский А.Л., Проваторов А.С., Величко С.А. и др. Фрикционные и ультразвуковые испытания функциональных покрытий. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2022, № 2, с. 103–112, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_2_103 EDN: SKEBFE
- [20] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В. и др. Моделирование ультразвукового воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89. EDN: TJLLFJ
- [21] Абашин М.И., Барзов А.А., Денчик А.И. и др. Анализ инновационного потенциала ультразвуковых гидротехнологий. *Наука и техника Казахстана*, 2016, № 3-4, с. 7–15. EDN: YMNAII
- [22] Барзов А.А., Галиновский А.Л. Полифункциональные возможности ультразвуковой технологии обработки материалов и жидкостей. *Вестник УГАТУ*, 2009, № 4, с. 116–120. EDN: KXKHYZ
- [23] Хафизов М.В. *Технологическое обеспечение ультразвуковой обработки деталей машиностроения методом акустической эмиссии*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 125 с.
- [24] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Хафизов М.В. и др. Ультразвуковая диагностика тонкопленочных покрытий. *Энерго- и ресурсосбережение — XXI век. Мат. XII межд. науч.-практ. интернет-конф.* Орел, Госуниверситет-УНПК, 2014, с. 148–150. EDN: XVWIUF
- [25] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Хафизов М.В. Экспресс-определение рациональных режимов гидроабразивной обработки материалов путем анализа данных акустической эмиссии. *Электротехника. Энергетика. Машиностроение. Сб. науч. тр. I Межд. науч. конф. молодых ученых. Ч. 3.* Новосибирск, НГТУ, 2014, с. 5–8. EDN: TXVWSB
- [26] Галиновский А.Л., Кравченко И.Н., Абашин М.И. и др. *Нож роторной дробилки*. Патент РФ 203903. Заявл. 09.11.2020, опубл. 26.04.2021.
- [27] Ли С., Галиновский А.Л., Кравченко И.Н. и др. Оценка функциональных свойств новой конструкции режущего инструмента для утилизации композиционных материалов методом ультразвуковой диагностики. *Технология металлов*, 2022, № 10, с. 52–59. EDN: VOIOOC
- [28] Ли С., Хоа В.Д. Разработка ультразвукового метода диагностики эксплуатационных свойств биметаллического инструмента. *Гагаринские чтения-2019. Сб. тез. док. XLV Межд. молодеж. науч. конф.* Москва, МАИ, 2019, с. 854–855. EDN: ZJBQSP
- [29] Ли С. Обеспечение рационального выбора инструментального материала ножей роторных измельчителей полимерных материалов на основе ультразвуковой диагностики. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 145 с.

- [30] Изотов Н.А., Галиновский А.Л., Янко М.А. Математическое моделирование криогенного охлаждения струеформирующего соплового элемента установки для гидроабразивной резки. *MauiTex 2022*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 196–197. EDN: NJESGV
- [31] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Изотов Н.А. *Способ гидроабразивной резки и устройство для его осуществления*. Патент РФ 2744633. Заявл. 25.08.2020, опубл. 12.03.2021.
- [32] Galinovskiy A.L., Izotov N.A. An experimental study of hydroerosion of surface of a chill metal under the influence of an abrasive-liquid ultra-jet. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 44, art. 150013, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035803>
- [33] Бурнашов М.А. *Повышение эффективности разрезания листовых неметаллических материалов водоледяными струями высокого давления*. Дисс. ... док. тех. наук. Орел, ОрелГТУ, 2010. 345 с.
- [34] Илюхина А.А. *Разработка струеформирующей системы мобильных гидроабразивных установок для подводной обработки конструкционных материалов*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 126 с.
- [35] Колпаков В.И., Илюхина А.А. *Физико-математическое моделирование функционирования струеформирующего тракта гидроабразивной установки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 36 с.
- [36] Илюхина А.А., Колпаков В.И., Вельтищев В.В. Обоснование конструктивных параметров составного струеформирующего сопла для мобильных установок подводной гидроабразивной резки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 4, с. 30–39, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-4-30-39>
- [37] Колпаков В.И., Галиновский А.Л., Судник Л.В. и др. *Импульсные технологии*. Старый Оскол, ТНТ, 2020. 432 с.
- [38] Колпаков В.И., Илюхина А.А. Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, № 9, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1913>
- [39] Меттер И. Физическая природа кавитации и механизм кавитационных повреждений. *УФН*, 1948, т. 35, № 1, с. 52–79, doi: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0035.194805c.0052>
- [40] Ширшов Я.Н., Нерсесян Д.А., Сысоев Н.Н. и др. Исследование процесса формирования струи воды, истекающей из сопла установки гидроабразивной резки. *Мат. X Межд. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014)*. Т. 1. Москва, Изд-во МАИ, 2014, с. 59–62.
- [41] Харламов А.И., Стунжас П.А., Кондрашев А.Я. и др. *Способ создания кавитации в струе жидкости*. Патент РФ 2155105. Заявл. 25.03.1999, опубл. 27.08.2000.
- [42] Ширшов Я.Н., Нерсесян Д.А., Сысоев Н.Н. и др. Оптические исследования динамики развития водяной струи высокого давления. *Мат. XI Межд. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016)*. Москва, Изд-во МАИ, 2016, с. 196–198. EDN: XCXLWN
- [43] Прохоров Н.А. Анализ возможностей реализации кавитирующих и пульсирующих струй для гидрорезания металлических конструкций. *Студенческая научная весна. Сб. тез. док. Всерос. студ. конф.* Москва, Научная библиотека, 2024, с. 560–562. EDN: GDVWHI
- [44] Галиновский А.Л., Кравченко И.Н., Величко С.А. и др. Повышение ресурса дисковых рабочих органов за счет использования новых материалов. *Технология металлов*, 2022, № 6, с. 43–48. EDN: QSLZFO

References

- [1] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L. et al. *Ultrastruynaya mezodiagnostika* [Ultrajet mesodiagnosics]. Moscow, MGU im. M.V. Lomonosova Publ., 2020. 250 p. (In Russ.).
- [2] Barzov A.A., Bekkiev A.Yu., Bochkarev S.V. et al. *Diagnostika i prognozirovaniye kachestva innovatsiy (na primere ultrastruynnykh gidrofizicheskikh tekhnologiy)* [Diagnostics and prediction of innovations quality (at the example of ultrashort hydrophysical technologies)]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2019. 328 p. (In Russ.).

- [3] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Golubev E.S. et al. Ultrajet diagnostics of the structural and anisotropic features of the parts fabricated by selective laser melting. *Elektrometallurgiya*, 2021, no. 2, pp. 13–21. EDN IHAVRQ (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Metall.*, 2021, vol. 6, pp. 794–800. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029521060069>)
- [4] Galinovskiy A.L., Papich A., Erokhin S.A. et al. Estimation of the possibility of extension of the potential of the method of ultrajet diagnostics of composite materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2021, no. 3, pp. 34–40. EDN JKLIEX (In Russ.). (Eng. version: *Polym. Sci. Ser. D*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 456–461. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421221030072>)
- [5] Galinovskiy A.L., Mikhaylov A.A., Vyshegorodtseva A.S. et al. Development of model for generation of interaction points between sample and abrasive particles in assessment of erosion resistance of paint-and-lacquer coatings. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2024, no. 1, pp. 19–25. EDN: UBYMYGL (In Russ.).
- [6] Galinovskiy A.L., Kovaleva D.E., Plokhikh A.I. et al. Ultra-jet diagnostics of damage to carbon fiber panels as a result of thermal cycling. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*, 2023, no. 8, pp. 3–10, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2023.08.pp.003-010> (in Russ.).
- [7] Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V., Nelyub V.A. *Tekhnologii proizvodstva i diagnostiki kompozitnykh konstruktsiy letatelnykh apparatov* [Technologies of production and diagnostics of composite structures of aircraft]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2019. 384 p. (In Russ.).
- [8] Abashin M.I. *Kontrol i diagnostika pri obespechenii kachestva mashinostroitelnykh izdeliy* [Control and diagnostics in quality assurance of machine-building products]. Moscow, Spektr Publ., 2012. 337 p. (In Russ.).
- [9] Li S., Galinovskiy A.L., Abashin M.I. et al. Ultra-jet method for evaluation of performance properties of bimetallic tool. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2019, no. 11, pp. 14–20, doi: <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-11-14-20> (in Russ.).
- [10] Kubagushev B.N., Abashin M.I. [Analysis of possibilities of application of ultrashort hydrodiagnostics to ensure industrial safety]. *Novye podkhody i tekhnologii proektirovaniya, proizvodstva, ispytaniy i promyshlennogo dizayna izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. II Mezhd. molod. konf.* [New Approaches and Technologies of Design, Production, Testing and Industrial Design of Rocket and Space Engineering Products. Proc. II Int. Youth Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2018, pp. 250–255. EDN: VVBKXN (In Russ.).
- [11] Abashin M.I., Barzov A.A., Bochkarev S.V. et al. Application of ultra-jet diagnostics for weld quality assessment. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, no. 9, pp. 26–29. EDN: SQLQYT (In Russ.).
- [12] Abashin M.I. *Uskorennoe opredelenie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya materiala izdeliy po rezultatam vozdeystviya na nego sverkhzvukovoy strui zhidkosti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Accelerated determination of the quality parameters of the surface layer of the product material based on the results of exposure to a supersonic liquid jet. Kand. Tech. sci. diss.]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2013. 152 p. (In Russ.).
- [13] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Petrochenkov A.B. et al. *Sposob kontrolya i diagnostiki ustoychivosti pokrytiya k deystviyu vneshnikh nagruzok* [Method of monitoring and diagnostics of resistance of coating to action of external loads]. Patent RU 2583332. Appl. 12.01.2015, publ. 10.05.2016. (In Russ.).
- [14] Galinovskiy A.L., Provatorov A.S. [Determination of performance and technological characteristics of nanostructured coatings based on the results of high-speed hydrojet impact on them]. *Klyuchevye trendy v kompozitakh: nauka i tekhnologii. Sb. mat. mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Key Trends in Composites: Science and Technology. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2019, pp. 137–141. EDN: UGCQBY (In Russ.).
- [15] Provatorov A.S., Galinovskiy A.L. [Accelerated determination of operational and technological characteristics of parts with nanostructured coatings based on the results of exposure to high-speed hydrojet]. *Perspektivnye podkhody i tekhnologii proektirovaniya i proizvodstva detaley i izdeliy aerokosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. Mezhd. molodezh. nauch.-tekh. konf.* [Perspective Approaches and Technologies of Design and Production of Aerospace Engineering Parts and Products. Proc. Int. Youth Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, Diona Publ., 2017, pp. 16–18. EDN: YQRUUG (In Russ.).

- [16] Abashin M.I., Khafizov M.V., Provatorov A.S. Toward the development of scientific and methodological basis for obtaining and diagnostics of nanostructured coatings. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2012, no. 10. EDN: PONWCN (In Russ.).
- [17] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Moiseev V.A. et al. Nanostructured coverings and features of their diagnostics methods. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering], 2014, no. 5, pp. 23–27. EDN: SJXQAX (In Russ.).
- [18] Tkachev A.G., Galinovskiy A.L., Barzov A.A. et al. *Sposob obrabotki neodnorodnykh gidrosred (zhidkostey)* [Method for processing inhomogeneous hydraulic media (liquids)]. Patent RU 2767096. Appl. 15.07.2020, publ. 16.03.2022. (In Russ.).
- [19] Galinovskiy A.L., Provatorov A.S., Velichko S.A. et al. Friction and ultrajet tests of functional coatings. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2022, no. 2, pp. 103–112, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2022_2_103 (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 8, pp. 864–871, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822080076>)
- [20] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V. et al. Modeling of ultra-jet influence for coating quality control. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89. EDN: TJLLFJ (In Russ.).
- [21] Abashin M.I., Barzov A.A., Denchik A.I. et al. Analysis of the innovation potential of ultra-hydraulic technologies. *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and Technology of Kazakhstan], 2016, no. 3-4, pp. 7–15. EDN: YMHAI (In Russ.).
- [22] Barzov A.A., Galinovskiy A.L. Polyfunctional capabilities of ultra-jet technology of processing materials and liquids. *Vestnik UGATU*, 2009, no. 4, pp. 116–120. EDN: KXKHYZ (In Russ.).
- [23] Khafizov M.V. *Tekhnologicheskoe obespechenie ultrastruynoy obrabotki detaley mashinostroeniya metodom akusticheskoy emissii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Technological support of ultra-jet machining of mechanical engineering parts by acoustic emission method. Kand. Tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016. 125 p. (In Russ.).
- [24] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Khafizov M.V. et al. [Ultrajet diagnostics of thin-film coatings]. *Energo- i resursoberezhenie — XXI vek. Mat. XII mezhd. nauch.-prakt. internet-konf.* [Energy and Resource Saving - XXI Century. Proc. XII Int. Sci.-Pract. Conf.]. Orel, Gosuniversitet-UNPK Publ., 2014, pp. 148–150. EDN: XVWIUF (In Russ.).
- [25] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Khafizov M.V. [Express-determination of rational modes of waterjet processing of materials by analyzing the acoustic emission data]. *Elektrotekhnika. Energetika. Mashinostroenie. Sb. nauch. tr. I Mezhd. nauch. konf. molodykh uchenykh*. Ch. 3 [Electrical engineering. Power Engineering. Mechanical Engineering. Proc. I Int. Sci. Conf. Of Young Scientists. P. 3]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2014, pp. 5–8. EDN: TXVWSB (In Russ.).
- [26] Galinovskiy A.L., Kravchenko I.N., Abashin M.I. et al. *Nozh rotornoy drobilki* [Impact crusher blade]. Patent RU 203903. Appl. 09.11.2020, publ. 26.04.2021. (In Russ.).
- [27] Li S., Galinovskiy A.L., Kravchenko I.N. et al. Evaluation of functional properties of new cutting tool design for utilization of composite materials by method of ultra-jet diagnostics. *Tekhnologiya metallov*, 2022, no. 10, pp. 52–59. EDN: BOIOOC (In Russ.).
- [28] Li S., Khoa V.D. [Development of an ultrashort method of diagnostics of operational properties of bimetallic tools]. *Gagarinskie chteniya-2019. Sb. tez. dok. XLV Mezhd. molodezh. nauch. konf.* [Gagarin readings-2019. Abs. XLV Int. Youth Sci. Conf.]. Moscow, MAI Publ., 2019, pp. 854–855. EDN: ZJBQSP (In Russ.).
- [29] Li S. *Obespechenie ratsionalnogo vybora instrumentalnogo materiala nozhey rotornykh izmelchiteley polimernykh materialov na osnove ultrastruynoy diagnostiki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Provision of rational choice of a tool material of knives of rotary shredders of polymeric materials on the basis of ultra-jet diagnostics. Kand. Tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 145 p. (In Russ.).
- [30] Izotov N.A., Galinovskiy A.L., Yanko M.A. [Innovative technologies, equipment and materials for blanking productions in mechanical engineering]. *MashTekh 2022*. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2022, pp. 196–197. EDN: NJESGV (In Russ.).
- [31] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Izotov N.A. *Sposob gidroabrazivnoy rezki i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for hydro-abrasive cutting and device for its implementation]. Patent RU 2744633. Appl. 25.08.2020, publ. 12.03.2021. (In Russ.).

- [32] Galinovskiy A.L., Izotov N.A. An experimental study of hydroerosion of surface of a chill metal under the influence of an abrasive-liquid ultra-jet. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 44, art. 150013, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035803>
- [33] Burnashov M.A. *Povyshenie effektivnosti razrezaniya listovykh nemetallicheskih materialov vodoleyanyimi struyami vysokogo davleniya*. Diss. dok. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of cutting sheet nonmetallic materials by high-pressure water-ice jets. Doc. Tech. sci. diss.]. Orel, OrelGTU Publ., 2010. 345 p. (In Russ.).
- [34] Ilyukhina A.A. *Razrabotka strueformiruyushchey sistemy mobilnykh gidroabrazivnykh ustanovok dlya podvodnoy obrabotki konstruktsionnykh materialov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a jet-forming system of mobile water-jet installations for underwater processing of structural materials. Kand. Tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2022. 126 p. (In Russ.).
- [35] Kolpakov V.I., Ilyukhina A.A. *Fiziko-matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya strueformiruyushchego trakta gidroabrazivnoy ustanovki* [Physico-mathematical modeling of functioning of a jet-forming path of a waterjet installation.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021. 36 p. (In Russ.).
- [36] Ilyukhina A.A., Kolpakov V.I., Veltishchev V.V. Engineered estimate of the design parameters of a built-up jet-forming nozzle for mobile underwater waterjet cutting systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 4, pp. 30–39, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2021-4-30-39> (in Russ.).
- [37] Kolpakov V.I., Galinovskiy A.L., Sudnik L.V. et al. *Impulsnye tekhnologii* [Pulse technologies]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2020. 432 p. (In Russ.).
- [38] Kolpakov V.I., Ilyukhina A.A. Features of mathematical modeling the destruction of structures of different materials under the high-speed waterjet. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2019, no. 9, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1913> (In Russ.).
- [39] Metter I. Physical nature of cavitation and mechanism of cavitation damage. *UFN*, 1948, vol. 35, no. 1, pp. 52–79, doi: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0035.194805c.0052> (in Russ.).
- [40] Shirshov Ya.N., Nersesyan D.A., Sysoev N.N. et al. [Investigation of the process of water jet formation flowing from the nozzle of a waterjet cutting unit]. *Mat. X Mezhd. konf. po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh (NPNJ'2014)*. [Proc. X Int. Conf. on Non-equilibrium Processes in Nozzles and Jets (NPNJ'2014). Vol. 1]. Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2014, pp. 59–62. (In Russ.).
- [41] Kharlamov A.I., Stunzhas P.A., Kondrashev A.Ya. et al. *Sposob sozdaniya kavitatsii v strue zhidkosti* [Method of forming cavitation in liquid jet]. Patent RU 2155105. Appl. 25.03.1999, publ. 27.08.2000. (In Russ.).
- [42] Shirshov Ya.N., Nersesyan D.A., Sysoev N.N. et al. [Optical studies of dynamics of high-pressure water jet development.]. *Mat. XI Mezhd. konf. po neravnovesnym protsessam v soplakh i struyakh (NPNJ'2016)* [Proc. XI Int. Conf. on Non-equilibrium Processes in Nozzles and Jets (NPNJ'2016)]. Moscow, Izd-vo MAI, 2016, pp. 196–198. EDN: XCXLWN (In Russ.).
- [43] Prokhorov N.A. [Analysis of the possibilities of realization of cavitating and pulsating jets for hydraulic cutting of metal structures]. *Studencheskaya nauchnaya vesna. Sb. tez. dok. Vseros. stud. konf.* [Student Scientific Spring. Abs. Russ. Student Conf.]. Moscow, Nauchnaya biblioteka Publ., 2024, pp. 560–562. EDN: GDVWHI (In Russ.).
- [44] Galinovskiy A.L., Kravchenko I.N., Velichko S.A. et al. Increasing the life of disk tool using new materials. *Tekhnologiya metallov*, 2022, no. 6, pp. 43–48. EDN: QSLZFO (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Metall.*, 2022, vol. 2022, no. 13, pp. 1755–1759, doi: <https://doi.org/10.1134/S0036029522130092>)

Информация об авторе

ЯНКО Мария Алексеевна — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: yanko@bmstu.ru).

Information about the author

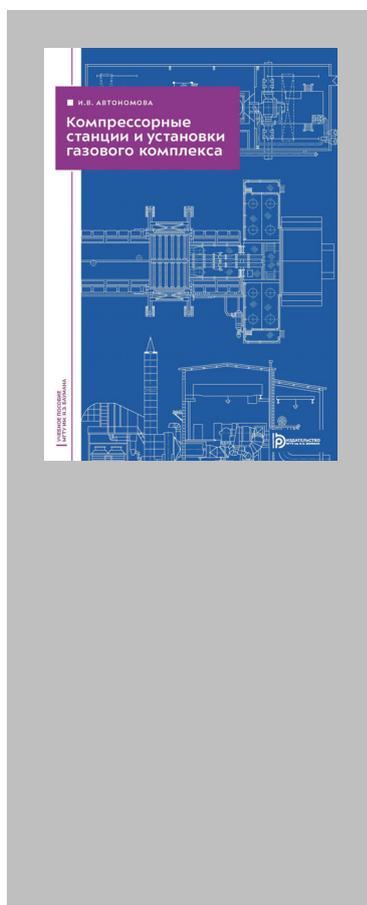
YANKO Mariya Alekseevna — Assistant, Technology of Rocket-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: yanko@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Янко М.А. Перспективы и возможности ультраструйного метода диагностики материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 12, с. 51–61.

Please cite this article in English as:

Yanko M.A. Prospects and possibilities of the ultra-jet diagnostics' method. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 12, pp. 51–61.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие

«Компрессорные станции и установки газового комплекса»

Автор И.В. Автономова

Изложены основные сведения об оборудовании компрессорных станций магистральных газопроводов, компрессорных станциях в установках переработки попутных нефтяных газов и газов газоконденсатных месторождений, а также компрессорном оборудовании в технологических процессах получения сжиженного природного газа. Рассмотрены технологические схемы компрессорных станций, вопросы их пуска и останова, подбора технологического оборудования, основные требования к конструктивному исполнению нагнетателей и компрессоров компрессорных станций.

Для самостоятельной проработки студентами, обучающимися по направлениям подготовки «Проектирование технологических машин и комплексов» и «Технологические машины и оборудование», материалов дисциплин «Компрессорные станции и установки» и «Компрессорные станции и установки газового комплекса». Приведенные в пособии сведения могут быть использованы в рамках научно-исследовательской работы студентов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>