

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.9.048.7

doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-3-14

Разработка метода гидроэрозионного насыщения жидкостей микрочастицами материалов мишеней с использованием ультраструи

А.Л. Галиновский, Чжо Мью Хтет, А.С. Проваторов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Developing a Method of Hydroerosive Saturation of Liquids with Microparticles of Target Materials Using Ultrajet

A.L. Galinovsky, Kyaw Myo Htet, A.S. Provatorov

Bauman Moscow State Technical University

Исследованы вопросы поиска инновационного применения ультраструйных технологий и возможности расширения их реализации на практике. Рассмотрены факторы, влияющие на процесс ультраструйного суспензирования. С их учетом разработана специальная технологическая оснастка и выбраны режимы обработки и технологические параметры. Приведены результаты экспериментальных исследований по суспензированию серебряных и медных мишеней. Изучен состав полученных суспензий и особенности частиц, образовавшихся в процессе гидроэрозии поверхности материала (мишеней). Установлено, что предложенная технология обладает широкими технологическими возможностями и рядом преимуществ перед традиционными методами получения суспензий.

Ключевые слова: методы суспензирования, ультраструйная обработка, микрочастицы материалов мишени

This paper presents a study on innovative use of ultrajet technologies and expanding their areas of applications. Factors influencing the process of ultrajet dispersing are determined, based on which special tooling is developed and operating modes and parameters are selected. The results of experimental studies on dispersing silver and copper targets are presented. The composition of the obtained suspensions and features of the particles formed in the process of hydroerosion of the material surface (targets) are examined. It is determined that the proposed technology possesses broad capabilities and advantages compared to traditional methods of obtaining suspensions.

Keywords: suspension methods, ultrajet processing, microparticles of target materials

Как известно, суспензии представляют собой двухфазную достаточно однородную гидроструктуру, состоящую из жидкости (коллоид-

ного раствора, геля и т. д.) и мелкодисперсных твердых частиц, находящихся при нормальных условиях во взвешенном состоянии. Большин-

ство гидротехнологических сред, в том числе обычную воду, можно рассматривать как специфические ультрамелкодисперсные суспензии с весьма малой концентрацией твердофазных частиц [1].

Наличие в жидкости твердых частиц с определенными показателями (составом, числом, концентрацией, формой, размерами и другими физико-химическими параметрами) способно привести к существенному изменению исходных свойств жидкости (матрицы) и наполните-

ля (самих частиц), например, вследствие проявления различных граничных эффектов. В этом смысле суспензия представляет собой жидкотвердофазную квазиравновесную систему, имеющую все признаки классического композиционного материала: реализацию принципов синергизма, структурной, а также физико-химической гетерогенности и т. д. [2].

Исходя из этого суспензию можно условно классифицировать как специфический жидкофазный композиционный материал, обладаю-

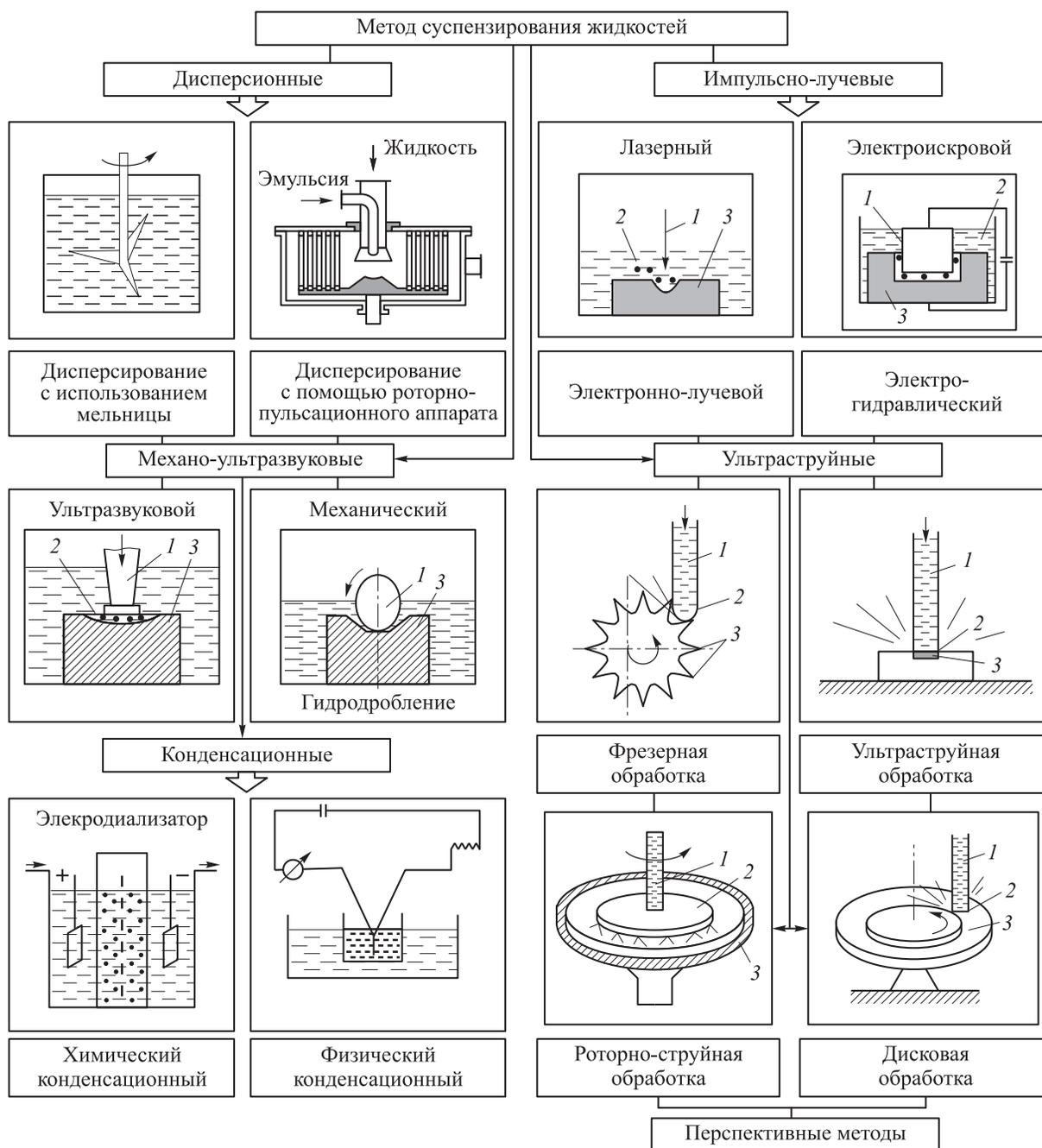


Рис. 1. Основные традиционные методы суспензирования жидкостей:
1 — ультразвуку (УС); 2 — суспензия; 3 — мишень

щий широкими функционально-технологическими возможностями и потребительскими свойствами. Хорошо известные технологии получения суспензий в разных отраслях промышленности, по существу, сводятся к двум основным методам: дисперсионному и конденсационному (рис. 1).

В конденсационном методе появление твердой фазы в жидкости обусловлено реализацией определенной цепочки физико-химических процессов, приводящих в итоге к конденсации из исходной жидкофазной системы (раствора) мелкодисперсных частиц, как правило, кристаллической структуры и определенного химического состава [3, 4].

Дисперсионный метод основан на измельчении исходного твердофазного материала (материалов) до заданной степени дисперсности. Этот процесс может осуществляться непосредственно

в суспензируемой жидкости, а также представлять собой отдельную технологическую операцию получения мелкодисперсного порошка, вводимого затем в исходную жидкость.

Доминирующим физико-технологическим процессом при дисперсионном производстве суспензий является управляемое многократное параллельно-последовательное фракционирование (разрушение) твердофазного наполнителя суспензии до мелкодисперсного состояния. Этот процесс характеризуется резким увеличением удельной поверхностной энергии образующихся твердых частиц, изменениями исходной дислокационной структуры наполнителя и т. д., что приводит к определенной активации получаемой суспензии [5, 6].

Большинство дисперсионных методов основано на механическом разрушении (измельче-

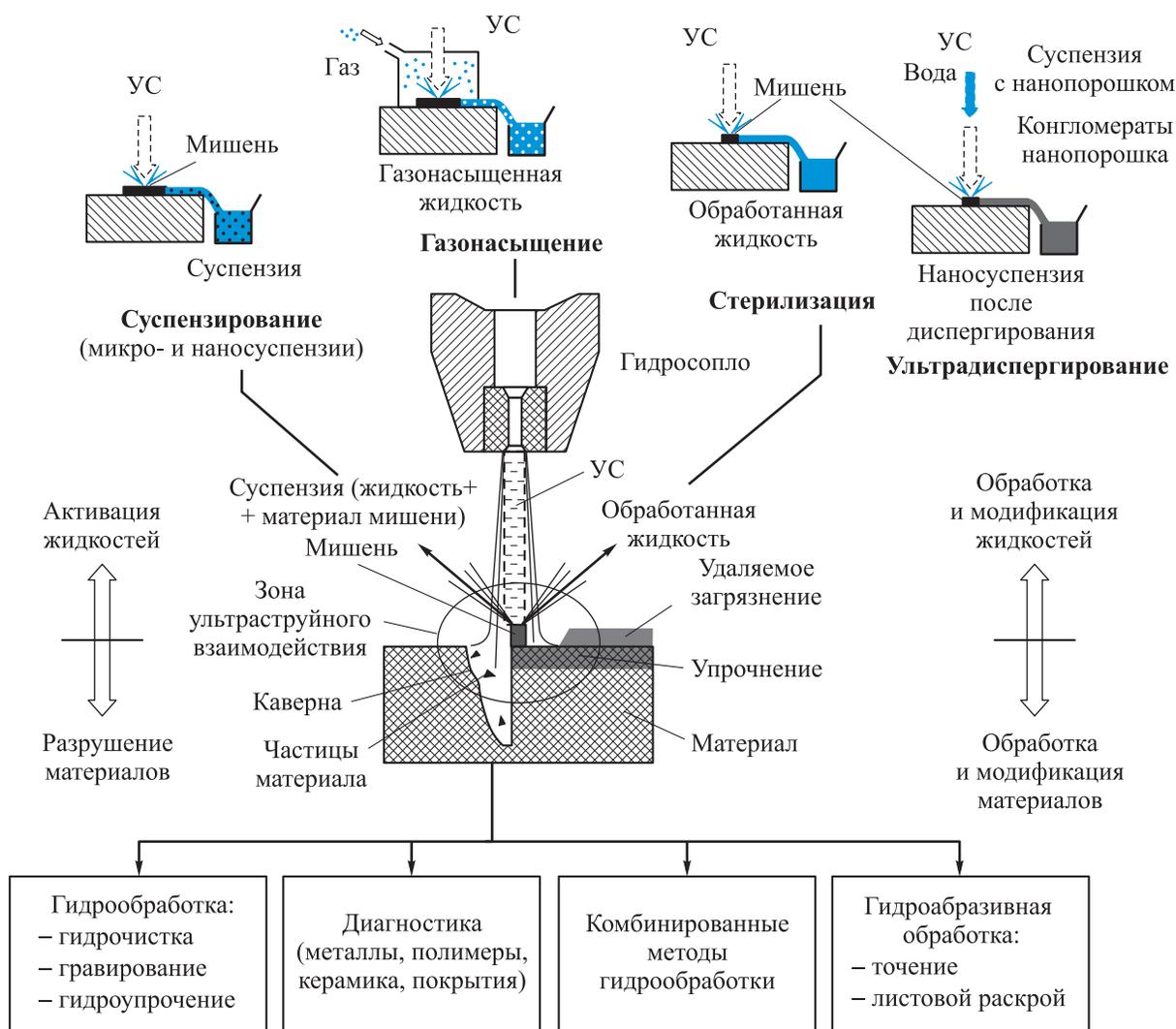


Рис. 2. Перспективные направления применения УСТ

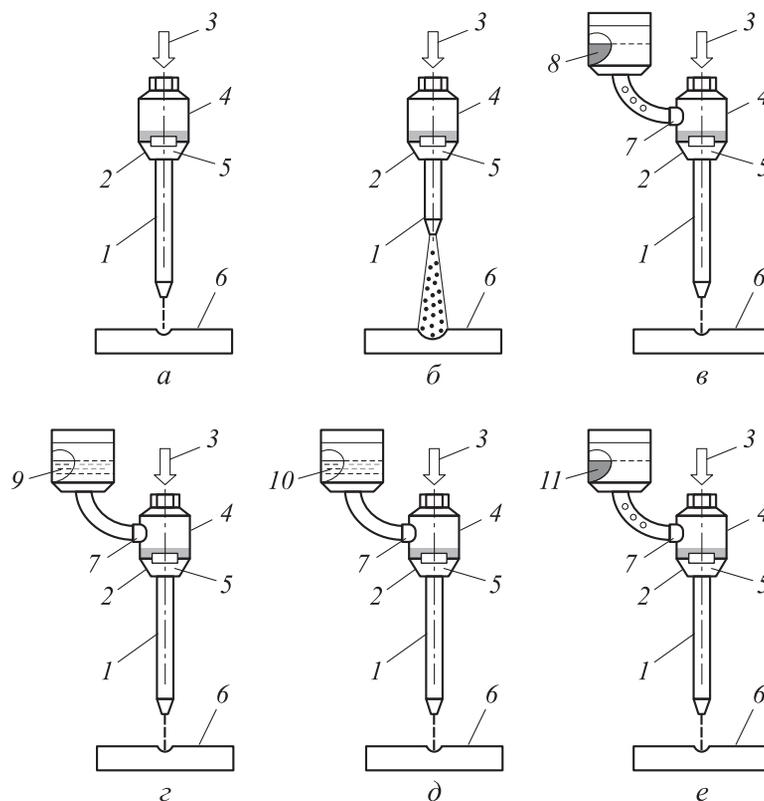


Рис. 3. Принципиальные схемы формирования УС в виде:

- а — жидкости (воды); б — спрею жидкости (воды); в — суспензии, состоящей из жидкости (воды) и водорастворимых наполнителей (частиц); з — суспензии, содержащей жидкость (воду) и гидротехнологические присадки; д — водолеяной суспензии; е — жидкости с твердыми частицами; 1 — формирующая трубка; 2 — зажимная втулка; 3 — подача воды; 4 — подача рабочей жидкости через струеформирующее гидросопло; 5 — зажимная гайка; 6 — объект исследования; 7 — всасывающий канал; 8 — подача полимерного порошка; 9 — присадка к жидкости; 10 — подача жидкого азота; 11 — подача абразива/порошка

нии, диспергировании) твердофазного материала наполнителя суспензии. Однако можно предложить и другие специфические способы диспергирования твердофазного наполнителя: испарение лучом лазера твердотельной мишени под слоем прозрачной жидкости, осуществление процесса диспергирования путем электрогидравлического разряда и т. п.

Среди известных способов механико-физического диспергирования следует выделить традиционный ультразвуковой метод (и его различные модификации) как достаточно универсальный и технологически полифункциональный вариант получения суспензий разной степени дисперсности, в том числе и ультрамелкодисперсных.

Однако, несмотря на широкое применение традиционных методов суспензирования жидкостей (см. рис. 1), все они имеют недостатки, включая невысокую производительность и энергоемкость. Таким образом, задача разработки новых методов суспензирования жидко-

стей является актуальной и практически значимой. С развитием ультразвуковых технологий (УСТ) открываются перспективные направления их использования, в том числе для получения различных суспензий и диспергирования жидкостей (рис. 2).

Причем возможны разные варианты технической реализации ультразвукового метода (см. рис. 1) и различные способы и принципы формирования УС (рис. 3).

Научная школа кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» проводила достаточно широкий спектр исследований по вопросам нового применения УСТ в промышленности. Известны работы М.И. Абашина, А.А. Барзова, И.В. Мазаева, Н.Н. Сысоева в области решения задач диагностики материалов и покрытий [7], исследования В.С. Пузакова по стерилизации жидкостей [8], труды Л.В. Судник, С.Г. Муляра, В.И. Колпакова [9], связанные с оптимизацией технологических процессов гидроабразивного резания и др.

Несмотря на значительное количество работ в указанных областях, авторы не затрагивали вопросы диспергирования и суспензирования жидкостей (см. рис. 2) с использованием высокоскоростной струи жидкости — УС. Это также подтверждает актуальность темы исследования.

Цель работы — анализ возможности повышения функциональных параметров и эксплуатационных свойств суспензий путем разработки и реализации ультраструйного метода их получения и диспергирования.

Основными задачами исследования являлись:

- нахождение рациональной схемы суспензирования с использованием УСТ;
- определение и систематизация факторов, влияющих на эффективность технологии изготовления суспензий;
- экспериментальное подтверждение возможности получения суспензий с применением различных материалов мишеней при использовании УСТ;
- анализ данных по размеру частиц и их концентрации в жидкости для различных материалов мишеней.

На первом этапе исследования выполнен экспертный анализ методов изготовления су-

спензий, основанных на УСТ, который показал, что перспективными среди них являются инновационная схема «фреза» (рис. 4, а), а также традиционная схема (рис. 4, б) по критерию достаточно широкого опыта ее применения. Схема «фреза» позволит повысить эффективность обработки, сократить стоимость необходимого оборудования, а также использовать насосные станции, рассчитанные на давление не более 100 МПа, вместо традиционных дорогих насосных станций мультипликаторного типа, создающих давление до 400 МПа [10–13].

В настоящее время на кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения» проводятся работы по созданию схемы типа «фреза» (см. рис. 4, а), а также эксперименты по обработке технологии суспензирования жидкости по традиционной схеме (см. рис. 4, б).

На втором этапе исследования проведена работа по определению совокупности факторов, влияющих на эффективность технологии получения суспензий. Результатом этой работы стало построение диаграммы Ишикава, содержащей совокупность выявленных факторов (рис. 5) [14–16]. Информация о них необходима для выбора режимов обработки, проектирования технологической оснастки (рис. 6), схем закрепления образцов и определения траектории движения струи жидкости по их поверхности.

В качестве материалов, использованных в экспериментах по получению суспензий, выбраны: чистое серебро (Ag — 999,9) и электролитическая медь Cu-ETP высокой степени чистоты (99,95 %).

Движение сопловой головки по поверхности образца осуществлялось по спирали Архимеда, длина траектории составила 575 мм. Это позволило обеспечить равномерность съема поверхностного слоя материала мишени (образца) по сравнению с точечным воздействием УС на поверхность и с круговыми движениями малого радиуса, как показано на рис. 7 [17–20].

На основании данных анализа причинно-следственной диаграммы (см. рис. 5) эксперименты по получению суспензии проведены при следующих режимах обработки: скорость подачи $S = 2$ мм/с, расстояние от среза фокусирующей трубки до поверхности образца $h = 2$ мм, время работы ультраструйной установки $t = 4$ мин, давление в гидросистеме $p = 200$ и 350 МПа. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

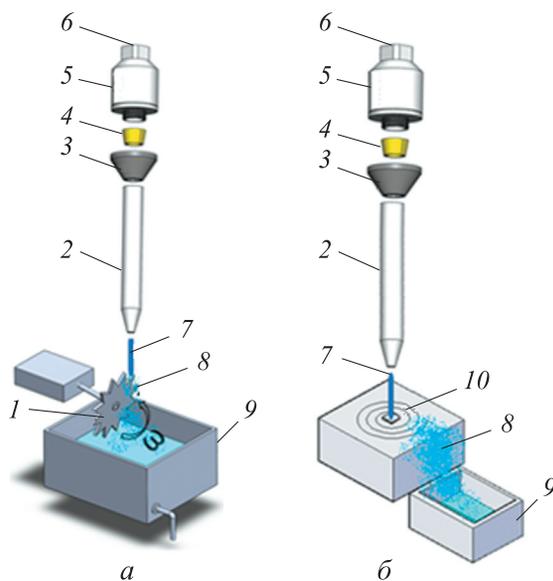


Рис. 4. Перспективная (а) и традиционная (б) схемы получения суспензий:

- 1 — подача воды под давлением 400 МПа;
 2 — высоконапорное гидросопло малого диаметра;
 3 — камера смешивания; 4 — высокоскоростная струя жидкости; 5 — фокусирующее гидросопло;
 6 — высокоскоростная кавитирующая струя;
 7 — обработанная вода; 8 — емкость-уловитель;
 9 — фреза; 10 — траектория;
 ω — частота вращения фрезы

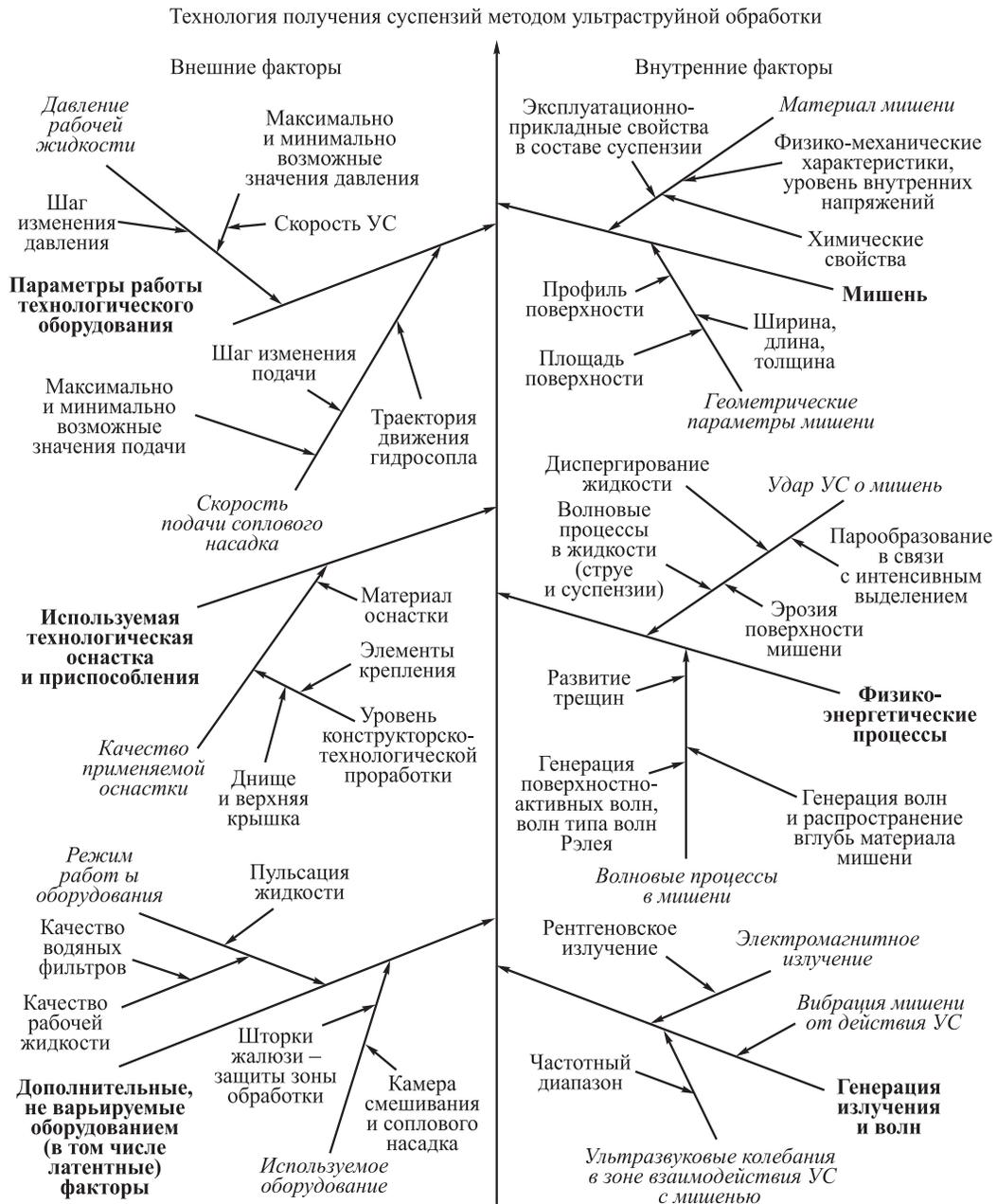


Рис. 5. Причинно-следственная диаграмма анализа факторов, влияющих на эффективность технологии получения суспензий методом ультразвуковой обработки



Рис. 6. Технологическая оснастка для получения и сбора суспензии:

а — закрепление образца в технологической оснастке; б — процесс совмещения гидросопла ультразвуковой установки с отверстием в диске верхней крышки емкости для сбора суспензии; в — емкость для конденсации обрабатываемой жидкости; г — твердосплавная мишень (VK8) 1 и гидрокаверна 2

Рис. 7. Бронзовая мишень с фрагментами зоны эрозии поверхности, образовавшейся в результате ультразвукового воздействия: 1 и 3 — движение гидросопла по спирали и кругу; 2 — точечное воздействие УС

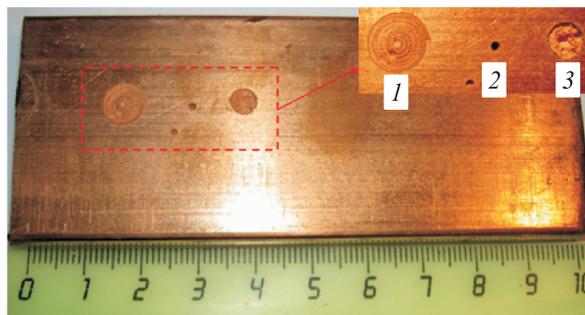


Таблица 1

Результаты экспериментов по получению суспензий при $S = 2 \text{ мм/с}$, $h = 2 \text{ мм}$, $t = 4 \text{ мин}$ и различных значениях давления в гидросистеме

Давление в гидросистеме, МПа	Масса мишени до/после обработки, г	Температура суспензии, °С	Диаметр снятого с мишени материала, мм	Скорость струи на срезе сопла, м/с	Расход рабочей жидкости, л/мин	Мощность, кВт	Масса унесенного материала, г
<i>Материал мишени — медь</i>							
200	138,67/138,63	54,0	18	447	4,7	45	0,040
350	139,04/138,67	73,0	18	592	6,3	60	0,460
<i>Материал мишени — серебро</i>							
200	69,62/69,38	55,6	–	447	4,7	45	0,240
350	72,29/69,62	78,4	–	592	6,3	60	2,670

Таблица 2

Результаты анализа геометрических параметров микрочастиц материала после ультразвукового гидровоздействия на них

Типоразмер, мкм ²		Количество частиц, %		Средняя площадь в рассматриваемом диапазоне, мкм ²
Более	До			
<i>Материал мишени — серебро</i>				
0	9000	69	89,60	2184
9000	18000	6	7,80	12974
18000	27000	0	–	–
27000	36000	1	1,30	28608
36000	45000	1	1,30	41418
<i>Материал мишени — медь</i>				
0	2500	136	85,50	816
2500	5000	17	10,50	3556
5000	7500	4	2,48	5363
7500	10000	0	–	–
10000	12500	1	0,62	11962
12500	15000	3	1,90	13117

Примечание. Типоразмер — площадь микрочастиц.

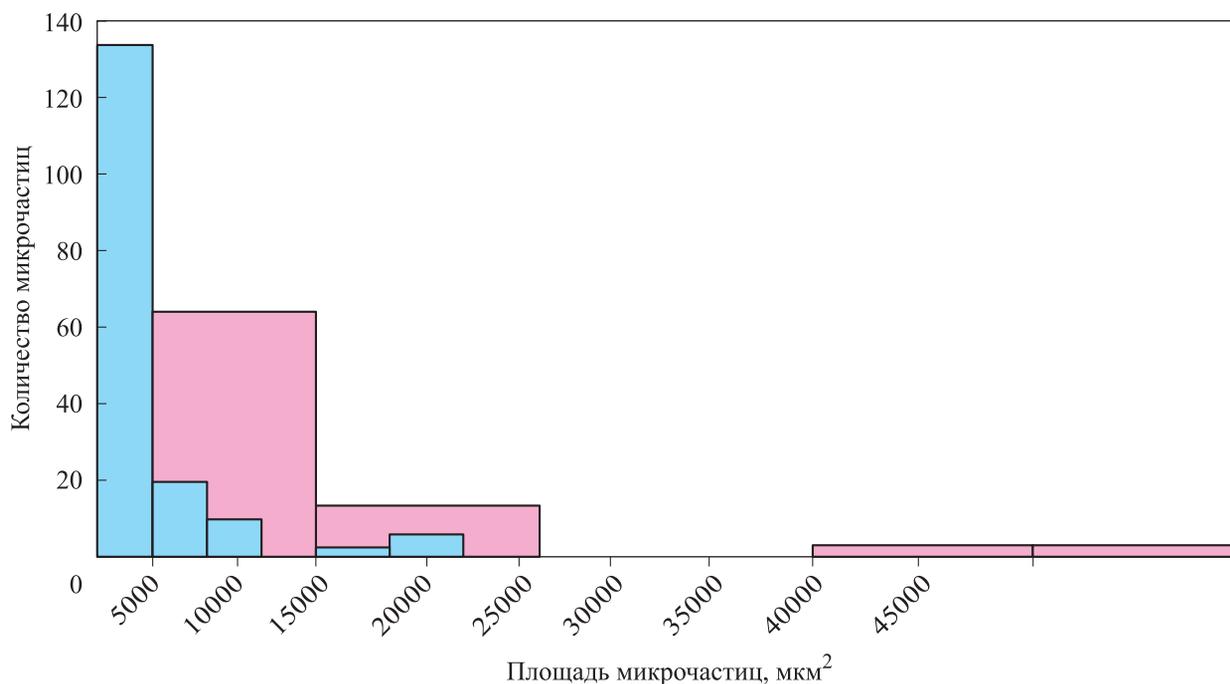


Рис. 8. Типовые распределения количества микрочастиц меди (■) и серебра (■) по их площади

На третьем этапе исследования с помощью анализатора частиц определены массовая концентрация ультраструйных суспензий, форма, размеры (табл. 2), а также распределения частиц твердой фазы, образующихся при гидродиспергировании мишеней, и частиц рассматриваемых материалов (рис. 8) по размерам (площади) в исследуемом объеме суспензии.

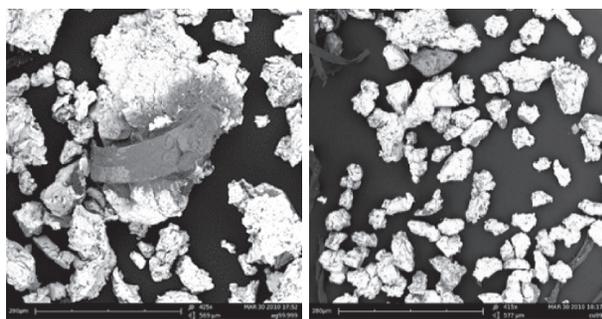
Анализ результатов экспериментов по ультраструйному суспензированию позволил заключить следующее:

- изменение технологических условий и режимов ультраструйного суспензирования существенно влияет на массовую концентрацию конечного продукта; в частности, установлено, что ультраструйное суспензирование при высо-

ком давлении в гидросистеме (350...400 МПа) на порядок повышает концентрацию материалов мишени в жидкости, что также было выявлено при использовании «мягких» мишеней (Cu, Ag) вместо стальных пластин (Ст45);

- форма, размеры и развитость поверхности микрочастиц значительно зависят от физико-механических характеристик материала образца;
- фракционные составы твердой фазы суспензий, полученных по УСТ, существенно различаются, что, очевидно, должно влиять на их функциональные свойства; на рис. 9 показаны структуры микрочастиц материалов мишени из серебра и меди после гидроэрозии их поверхности в результате воздействия УС.

Учитывая результаты предыдущих исследований [8], можно предположить, что широкие возможности технологии ультраструйного суспензирования по варьированию входных и выходных параметров обработки позволят гибко подходить к решению разнообразных задач, таких как повышение физико-химической активности суспензии, низкотемпературная стерилизация, изменение водородного показателя, микробиологических свойств и др.



а

б

Рис. 9. Структуры микрочастиц материалов мишени из серебра при увеличении $\times 425$ (а) и меди при увеличении $\times 415$ (б) после гидроэрозии их поверхности в результате воздействия УС

Выводы

1. Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что в целом можно говорить о возможности применения УС для

получения суспензий. УСТ имеет ряд преимуществ и принципиальных отличий от других технологий. В частности, она базируется на мощном ударно-динамическом воздействии, которое оказывает УС на твердотельную обрабатываемую мишень.

2. По плотности мощности УС соизмерима с промышленными лазерами. Причем ранее было доказано, что высокоскоростное воздействие УС оказывает влияние на свойства жидкостей, близкое по своим результатам технологии ультразвуковой обработки [10–12].

3. С учетом ранее выполненных исследований [8, 13], можно утверждать, что энергия вновь образованных поверхностей материала мишени — поверхностная энергия микрочастиц твердой фазы — весьма значительна.

4. Как следствие, данные частицы весьма реакционно способны в физико-химическом отношении. Это позволяет создавать новые гидротехнологии использования ультразвуковых микро- и наносуспензий и соответствующих

гельструктур, в частности, на базе водорастворимых полимеров, высокомолекулярных органических жидкостей и жидких кристаллов.

5. Широкие возможности по варьированию технологических режимов УСТ обеспечивают ей преимущества перед другими методами при решении разнообразных задач, стоящих перед процедурой суспензирования, и при формировании ее конечных свойств.

6. На существующем этапе реализации экспериментов выявлены следующие недостатки ультразвукового метода: малая производительность обработки, высокие энергозатраты, применение дорогостоящего оборудования, отсутствие возможности циклической обработки суспензии и повышения концентрации в ней материалов мишеней.

7. В значительной степени этих недостатков будет лишена технологическая схема «фреза», разрабатываемая на кафедре «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Литература

- [1] Белов В.А., Вельтищев В.В., Илюхина А.А., Мугла Д.Р. Экспериментальное определение рациональных параметров элементов струеформирующего тракта установки для подводной гидроабразивной резки материалов. *Вестник Брянского государственного технического университета*, 2018, № 7, с. 4–12, doi: 10.30987/article_5ba8a1860f13c0.98445000
- [2] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Проваторов А.С. Информационно-физический механизм ультрагидроструйной диагностики качества функциональных покрытий. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2019, № 2, с. 51–57.
- [3] Галиновский А.Л., Чжо Мьо Хтет, Проваторов А.С. К вопросу эффективности различных методов диспергирования наносодержащих суспензий. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2019, № 11, с. 2–7, doi: 10.31044/1994-6260-2019-0-11-2-7
- [4] Singh M.K., Ratha D., Kumar S., Kumar D. Influence of particle-size distribution and temperature on rheological behavior of coal slurry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2016, vol. 36, iss. 1, pp. 44–54, doi: 10.1080/19392699.2015.1049265
- [5] Барзов А.А., Белов В.А., Виноградова Е.П., Сысоев Н.Н., Хахалин А.В. Функционально-технологические возможности теплофизического управления ультразвуковыми гидроконттактными взаимодействиями. *Препринт Физического факультета МГУ*, 2018, № 4, с. 1–39.
- [6] Singh A., Mari R., Denn M.M., Morris J.F. A constitutive model for simple shear of dense frictional suspensions. *Journal of Rheology*, 2018, vol. 62, iss. 2, pp. 457–468, doi: 10.1122/1.4999237
- [7] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Мазаева И.В., Сысоев Н.Н. *Ультразвуковая гидродинамика (технологии и экономика)*. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015. 308 с.
- [8] Пузаков В.С. *Разработка и анализ функциональных возможностей ультразвуковой активации гидротехнологических сред для механообрабатывающего производства*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 16 с.
- [9] Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Муляр С.Г., Абашин М.И., Проваторов А.С. Модернизация технологии оценки эксплуатационных динамических

- свойств композиционной конструкционной керамики путем использования гидроабразивной ультраструи. *Наука и Образование: Научное издание*, 2014, № 3, с. 15–23, doi: 10.7463/0314.0701307
- [10] Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сысоев Н.Н., Литвин Н.К., Томак В.И., Барзов А.А. Ударно-кавитационный механизм генерации рентгеновского излучения при кавитации быстрой струи воды. *Вестник Московского университета. Физика. Астрономия*, 2010, № 1, с. 46–50.
- [11] Барзов А.А., Вдовин А.А., Кибальченко А.В., Петухов Е.Н. *Способ обработки воды*. Пат. 2031847 РФ, 1990.
- [12] Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной обработке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 1, с. 107–116.
- [13] Барзов А.А., Ерофеева В.В., Сысоев Н.Н., Сысоев П.Н., Яблочников С.Л. Анализ влияния структурно-латентных факторов физико-технологических инноваций на потенциал их функциональной результативности. *Препринт Физического факультета МГУ*, 2018, № 5, с. 1–33.
- [14] Dickinson E. Colloids in Food: Ingredients, Structure, and Stability. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2015, vol. 6, pp. 211–233. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015651>
- [15] Liu Y., Guo X., Lu H., Gong X., Sun X., Zhao W. An investigation of the effect of particle size on the flow behavior of pulverized coal. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 284, pp. 698–713, doi: 10.1016/j.powtec.2015.06.041
- [16] Leverrier C., Almeida G., Cuvelier G. Influence of particle size and concentration on rheological behaviour of reconstituted apple purees. *Food Biophysics*, 2016, vol. 11, iss. 3, pp. 235–247, doi: 10.1007/s11483-016-9434-7
- [17] Gamonpilas C., Morris J.F., Denn M.M. Shear and normal stress measurements in non-Brownian monodisperse and bidisperse suspensions. *Journal of Rheology*, 2016, vol. 60, iss. 2, pp. 289–296, doi: 10.1122/1.4942230
- [18] Mwasame P.M., Wagner N.J., Beris A.N. Modeling the effects of polydispersity on the viscosity of noncolloidal hard sphere suspensions. *Journal of Rheology*, 2016, vol. 60, iss. 2, pp. 225–240, doi: 10.1122/1.4938048
- [19] Pednekar S., Chun J., Morris J.F. Simulation of shear thickening in attractive colloidal suspensions. *Soft Matter*, 2017, vol. 13, iss. 6, pp. 1773–1779, doi: 10.1039/c6sm02553f
- [20] Wang M., Brady J.F. Spectral Ewald acceleration of Stokesian Dynamics for polydisperse suspensions. *Journal of Computational Physics*, 2016, vol. 306, pp. 443–477, doi: 10.1016/j.jcp.2015.11.042

References

- [1] Belov V.A., Vel'tishchev V.V., Ilyukhina A.A., Mugla D.R. Eksperimental'noye opredeleniye ratsional'nykh parametrov elementov struyeformiruyushchego trakta ustanovki dlya podvodnoy gidroabrazivnoy rezki materialov. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2018, no. 7, pp. 4–12 (in Russ.), doi: 10.30987/article_5ba8a1860f13c0.98445000
- [2] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Provatorov A.S. Information-physical mechanism of diagnostic of functional coatings erosive wear by water jet. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*, 2019, no. 2, pp. 51–57 (in Russ.).
- [3] Galinovskiy A.L., Chzho M'o Khtet, Provatorov A.S. On effectiveness problem of different methods of nanocontaining suspension dispersion. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2019, no. 11, pp. 2–7, doi: 10.31044/994-6260-2019-0-11-2-7
- [4] Singh M.K., Ratha D., Kumar S., Kumar D. Influence of particle-size distribution and temperature on rheological behavior of coal slurry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2016, vol. 36, iss. 1, pp. 44–54, doi: 10.1080/19392699.2015.1049265
- [5] Barzov A.A., Belov V.A., Vinogradova E.P., Sysoyev N.N., Khakhalin A.V. Functional and technological capabilities of thermophysical control of ultra-jet hydrocontact interactions. *Preprint Fizicheskogo fakul'teta MSU*, 2018, no. 4, pp. 1–39 (in Russ.).

- [6] Singh A., Mari R., Denn M.M., Morris J.F. A constitutive model for simple shear of dense frictional suspensions. *Journal of Rheology*, 2018, vol. 62, iss. 2, pp. 457–468, doi: 10.1122/1.4999237
- [7] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Mazayeva I.V., Sysoyev N.N. *Ul'trastruynaya gidrodinamika (tehnologii i ekonomika)* [Ultra-jet hydrodynamics (technology and economics)]. Moscow, MSU publ., 2015. 308 p.
- [8] Puzakov V.S. *Razrabotka i analiz funktsional'nykh vozmozhnostey ul'trastruynoy aktivatsii gidrotekhnologicheskikh sred dlya mekhanooobrabatyvayushchego proizvodstva*. Avtoref. Kand. Diss. [Development and analysis of the functionality of ultra-jet activation of hydro-technological environments for machining production. Abstract Cand. Diss.]. Moscow, Bauman Press, 2007. 16 p.
- [9] Sudnik L.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., Mulyar S.G., Abashin M.I., Provatorov A.S. Modernization of technology of composite constructional ceramics operational dynamic properties estimating by means of a hydroabrasive ultrastream. *Science and Education: Scientific Publication*, 2014, no. 3, pp. 15–23 (in Russ.), doi: 10.7463/0314.0701307
- [10] Kornilova A.A., Vysotskiy V.I., Sysoyev H.H., Litvin N.K., Tomak V.I., Barzov A.A. Shock-cavitation mechanism of X-ray at cavitation of fast water stream. *Moscow University Physics Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 46–50 (in Russ.).
- [11] Barzov A.A., Vdovin A.A., Kibal'chenko A.V., Petukhov E.N. *Sposob obrabotki vody* [The method of water treatment]. Patent RF no. RUS 2031847, 1990.
- [12] Tarasov V.A., Polukhin A.N. Estimation of Geometric Parameters of Formed Surface during Hydro-Abrasive Treatment. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 1, pp. 107–116 (in Russ.).
- [13] Barzov A.A., Erofeeva V.V., Sysoyev N.N., Sysoyev P.N., Yablochnikov S.L. Analysis of the influence of structural latent factors of physical and technological innovations on the potential of their functional effectiveness. *Preprint Fizicheskogo fakul'teta MGU*, 2018, no. 5, pp. 1–33 (in Russ.).
- [14] Dickinson E. Colloids in Food: Ingredients, Structure, and Stability. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2015, vol. 6, pp. 211–233. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015651>
- [15] Liu Y., Guo X., Lu H., Gong X., Sun X., Zhao W. An investigation of the effect of particle size on the flow behavior of pulverized coal. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 284, pp. 698–713, doi: 10.1016/j.powtec.2015.06.041
- [16] Leverrier C., Almeida G., Cuvelier G. Influence of particle size and concentration on rheological behaviour of reconstituted apple purees. *Food Biophysics*, 2016, vol. 11, iss. 3, pp. 235–247, doi: 10.1007/s11483-016-9434-7
- [17] Gamonpilas C., Morris J.F., Denn M.M. Shear and normal stress measurements in non-Brownian monodisperse and bidisperse suspensions. *Journal of Rheology*, 2016, vol. 60, iss. 2, pp. 289–296, doi: 10.1122/1.4942230
- [18] Mwasame P.M., Wagner N.J., Beris A.N. Modeling the effects of polydispersity on the viscosity of noncolloidal hard sphere suspensions. *Journal of Rheology*, 2016, vol. 60, iss. 2, pp. 225–240, doi: 10.1122/1.4938048
- [19] Pednekar S., Chun J., Morris J.F. Simulation of shear thickening in attractive colloidal suspensions. *Soft Matter*, 2017, vol. 13, iss. 6, pp. 1773–1779, doi: 10.1039/c6sm02553f
- [20] Wang M., Brady J.F. Spectral Ewald acceleration of Stokesian Dynamics for polydisperse suspensions. *Journal of Computational Physics*, 2016, vol. 306, pp. 443–477, doi: 10.1016/j.jcp.2015.11.042

Статья поступила в редакцию 23.09.2019

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: galcomputer@mail.ru).

ЧЖО Мью Хтет — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: htet2066@gmail.com).

ПРОВАТОРОВ Александр Сергеевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: sanru41@rambler.ru).

Information about the authors

GALINOVSKY Andrei Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Hospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: galcomputer@mail.ru).

KYAW Myo Htet — Postgraduate, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Hospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: htet2066@gmail.com).

PROVATOROV Aleksandr Sergeevich — Postgraduate, Technology of Rocket-and-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Hospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: htet2066@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Чжо Мью Хтет, Проваторов А.С. Разработка метода гидроэрозионного насыщения жидкостей микрочастицами материалов мишеней с использованием ультраструи. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 3, с. 3–14, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-3-14

Please cite this article in English as:

Galinovskiy A.L., Kyaw Myo Htet, Provatorov A.S. Developing a Method of Hydroerosive Saturation of Liquids with Microparticles of Target Materials Using Ultrajet. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 3, pp. 3–14, doi: 10.18698/0536-1044-2020-3-3-14



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет монография А.А. Смердова

«Оптимизация композитных структур в ракетно-космической технике. Краткий курс в тринадцати лекциях»

В курсе лекций приведены основные положения теории оптимального проектирования конструкций, рассмотрены методы проектных расчетов композитных материалов и простейших элементов конструкций, а также несущих композитных оболочек различных конструктивных схем и размеростабильных композитных космических конструкций. Представлены алгоритмы расчета типовых композитных элементов конструкций, которые могут быть самостоятельно использованы студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Курс лекций предназначен для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Материал отдельных лекций может быть также использован при изучении смежных дисциплин, таких как «Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники», «Строительная механика ракет» и «Строительная механика космических аппаратов».

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; www.baumanpress.ru