

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,  
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

УДК 621.9

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВА  
СО СТЕНКАМИ СОПЛА ГИДРОАБРАЗИВНОГО СТАНКА  
ПРИ ВВЕДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА**

© 2025 г. О. Г. Кожус<sup>1</sup>, Г. В. Барсуков<sup>1</sup>,  
И. Н. Кравченко<sup>2</sup>, \* Ю. А. Кузнецов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Орел, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН

Москва, Россия

<sup>3</sup>Орловский государственный аграрный университет им. Н. В. Парадина,

Орел, Россия

\*e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.09.2024 г.

После доработки 13.10.2024 г.

Принята к публикации 20.10.2024 г.

В статье выявлены закономерности разрушения абразива и стенок канала соплового насадка гидроабразивного станка при движении многофазного потока, модифицированного поверхностно-активными веществами. Представлены результаты моделирования кинематических характеристик движения абразивных частиц в многофазном потоке с поверхностно-активными веществами, а также результаты моделирования контактного взаимодействия абразива со стенками сопла гидроабразивного станка. Сделаны выводы о влиянии геометрии профиля канала соплового насадка на разрушение абразива и поверхности струеобразующего канала.

**Ключевые слова:** абразив, поверхностно-активные вещества, моделирование, резание, гидроабразивная струя

**DOI:** 10.31857/S0235711925010061, **EDN:** EQMAJQ

Многофазные сверхзвуковые течения в каналах миллиметрового диапазона представляют большой интерес из-за их технических приложений. Подобные течения имеют важные практические применения, в частности, в реактивных двигателях малой тяги (микротрастирах) и энергетических установках на твердом топливе, при работе систем пневмотранспорта и технологического оборудования, при обтекании тел летательных аппаратов, новых технологиях производства электронных микросхем, при нанесении покрытий, машиностроительных технологиях и др. Полученные результаты весьма актуальны для технологии резания материалов сверхзвуковой гидроабразивной струей [1–3].

Гидроабразивное резание является одной из самых передовых и востребованных технологий в мире. Оно нашло успешное применение не только для резания любых материалов в промышленности [4–6], но и для глубоководного ремонта, дефрагментации, очистки трубопроводных систем морского заложения, в том числе и в условиях Арктики. При формировании сверхзвуковой гидроабразивной струи

используются фокусирующие трубы диаметром менее 1 мм, которые подвержены значительному износу при прохождении частиц абразива [7–9]. При глубоководном резании, например в условиях Арктики, быстрый износ сопла требует его частого подъема и замены, что связано с большими затратами времени и средств [10–12].

Обеспечить повышение скорости истечения гидроабразивной струи для резания материалов и увеличить производительность обработки можно за счет снижения гидравлического сопротивления и турбулентного трения в канале фокусирующей трубы сопла гидроабразивной установки путем введения поверхностно-активного вещества (ПАВ) [13, 14].

Динамика гидроабразивного резания при введении ПАВ в зону формирования гидроабразивной струи будет определяться способностью их молекул адсорбироваться на поверхности раздела фаз «жидкость–стенки канала сопла» в основном ориентированным образом [15].

Наличие ПАВ существенно изменяет свойства течения сверхзвукового многофазного потока из-за модификации скорости диссипации энергии и изменения кинетической энергии турбулентности на стенке канала трубы.

В то же время прогнозирование разрушения канала под действием твердых частиц существенно упростит решение технических проблем при эксплуатации гидроабразивного оборудования при введении добавок ПАВ. Основная проблема заключается в том, что аналитическое описание сложного процесса взаимодействия частиц многофазной среды со стенками канала миллиметрового диапазона в общей математической постановке затруднительно.

**Моделирование кинематических характеристик движения абразивных частиц в многофазном потоке с ПАВ.** Разработана модель движения гидроабразивного потока с использованием вычислительного пакета Ansys Fluent. Основным подходом при моделировании являлось решение уравнений Навье–Стокса методом контрольных объемов [16, 17]. При этом модель сочетает в себе модель турбулентности  $k$ -омега и модель турбулентности  $k$ -epsilon, таким образом, что  $k$ -омега используется во внутренней области пограничного слоя и переключается на  $k$ -epsilon при свободном сдвиговом течении. Поле скоростей вычислялось на основе уравнения моментов, а поле давления рассчитывалось путем решения уравнений для давления, которое является следствием уравнения неразрывности и уравнения моментов с применением решателя Pressure-Based.

Расчет течений гидроабразивного потока проведен с учетом взаимного влияния абразивных частиц (2-way particle–water flow). Рассмотрены течения с абразивными частицами диаметром от 0.15 мм до 0.4 мм. Моделирование движения гидроабразивного потока осуществлено для следующих граничных условий: скорость струи воды 850 м/с, давление 400 МПа. Модель канала сопла построена с учетом наличия камеры смешивания жидкости с абразивом, что существенно повышает точность расчетов движения гидроабразивного потока. Скорость подачи абразива в камеру смешивания 10 м/с.

При введении ПАВ скорость несущей жидкости на стенке не равна нулю, т.е. абразивные частицы попадают в пограничный слой и происходит их более медленное торможение, чем в потоке без ПАВ. Поэтому в модель движения введена поправка на инерционность частиц при их движении в пограничном слое, которой является локальное число Стокса [18]. Это позволило учесть явление снижения динамической вязкости на стенке канала при введении ПАВ и внести поправку на траекторию движения абразивных частиц на стенке фокусирующей трубы.

Расчетная схема движения абразивных частиц в фокусирующей трубке сопла представлена на рис. 1.

Отмечается, что внутри смесительной камеры вихревые явления обеспечивают первоначальный механизм захвата увлечения абразива с ПАВ струей жидкости.

Наибольшая скорость потока наблюдается на входе в камеру смешения, далее скорость гидроабразивного потока постепенно снижается в направлении оси сопла и повышается в фокусирующей трубке за счет сужения канала на выходе и достигает наибольшей скорости на выходе из соплового насадка (рис. 2). При этом место входа суспензии ПАВ с абразивом рекомендуется располагать в зоне наиболее низкого давления.

Результаты моделирования также показывают, что максимальное значение скорости колебаний абразива происходит в середине смесительной камеры, а далее наблюдается ее снижение перед входом в конусную часть фокусирующей трубы (рис. 3). Это связано с торможением высокоскоростного течения и его поджатием. Наибольшее сжатие гидроабразивного потока в месте перехода конусного отверстия в цилиндрическое обуславливает потерю в 3 раза амплитуды скорости абразива с 300 до 100 м/с. В то же время при движении жидкости в сужающем канале сопла происходит ее ускорение, что способствует разгону абразива до 287 м/с.

Таким образом, наибольшая скорость гидроабразивного потока наблюдается в смесительной камере, которая уменьшается и достигает более низкой скорости на выходе из сужения канала, а затем увеличивается вдоль оси сопла. Введение ПАВ будет способствовать разгону абразива в фокусирующей трубке до более высоких скоростей.

Проведено моделирование траектории движения абразива в потоке жидкости, чтобы показать влияние размера частиц на их продольную и поперечную скорость. При этом диаметр частиц лежал в диапазоне от 0.15–0.4 мм.

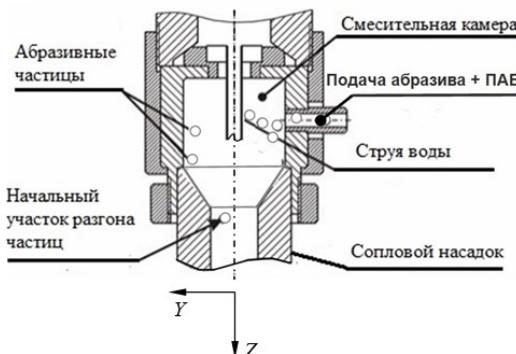


Рис. 1. Схема движения абразивных частиц в сопловом насадке (фокусирующей трубке).

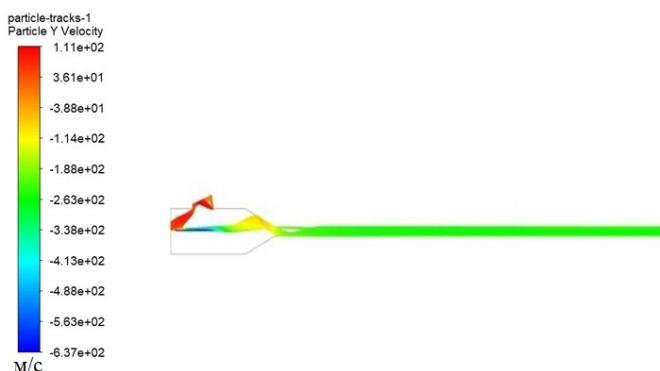


Рис. 2. Модель изменения продольной скорости абразивных частиц в сопле: диаметр отверстия  $d_c = 1.02$  мм, длина соплового насадка  $l = 100$  мм.

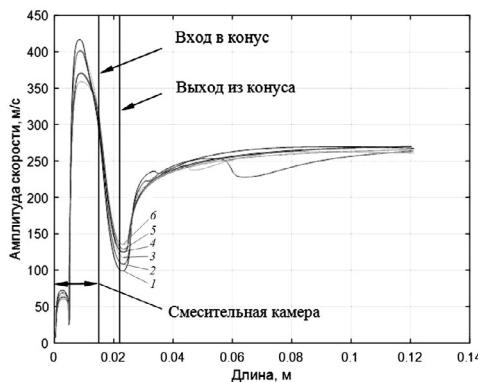


Рис. 3. Изменение амплитуды скорости абразива по оси  $Y$  соплового насадка:  
 $d_c = 1.02$  мм,  $l = 100$  мм, диаметр абразива 0.15–0.4 мм:  
1 – 0.15 мм; 2 – 0.2 мм; 3 – 0.25 мм; 4 – 0.3 мм; 5 – 0.35 мм; 6 – 0.4 мм.

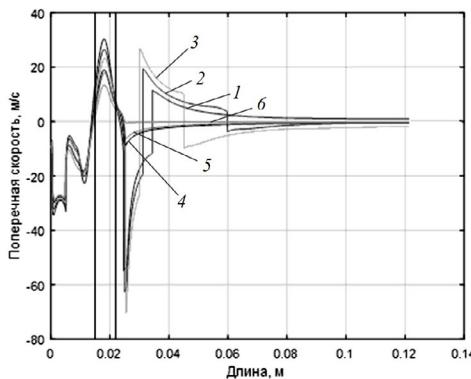


Рис. 4. Изменение поперечной скорости абразива по оси  $Z$  соплового насадка:  
 $d_c = 1.02$  мм,  $l = 100$  мм: 1 – 0.15 мм; 2 – 0.2 мм; 3 – 0.25 мм; 4 – 0.3 мм; 5 – 0.35 мм; 6 – 0.4 мм.

Установлено, что траектория движения одной частицы абразива зависит как от диаметра, так и от геометрии канала сопла переменного сечения. Частицы меньшего диаметра более подвержены отклонению от направления течения потока жидкости и имеют наибольшую поперечную скорость при выходе из конуса с максимальной амплитудой траектории движения (рис. 4). Интенсивность поперечной скорости способствует их удару о стенку конического сечения и падению скорости движения. Когда частицы взаимодействуют с потоком жидкости в месте перехода конуса в цилиндр, где наблюдается максимальная турбулентность потока, наблюдается пересечение центральной линии сопла до столкновения с противоположной стенкой сопла. Этот процесс повторяется несколько раз, пока траектория частиц окончательно не стабилизируется, примерно на расстоянии половины длины фокусирующей трубки. Очевидно, что размер частиц оказывает большое влияние на траектории движения абразива.

Получены данные о кинематических характеристиках движения абразивных частиц, взаимодействующих со стенками соплового насадка: углы атаки абразива на стенку канала в цилиндрической части соплового насадка лежат в диапазоне  $2^\circ$ – $16^\circ$ , а на входе в канал насадка — от  $30^\circ$ – $90^\circ$ .

**Моделирование контактного взаимодействия абразива с ПАВ со стенками сопла гидроабразивного станка.** Моделирование контактного взаимодействия абразива с ПАВ со стенками сопла гидроабразивного станка проведено с использованием многоцелевого конечно-элементного расчетного комплекса ANSYS LS-DYNA [19]. В качестве абразива был выбран карбид кремния. Физико-механические характеристики, используемые при моделировании частицы абразива, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Модель среды Jonson–Holmquist (ceramic material model)

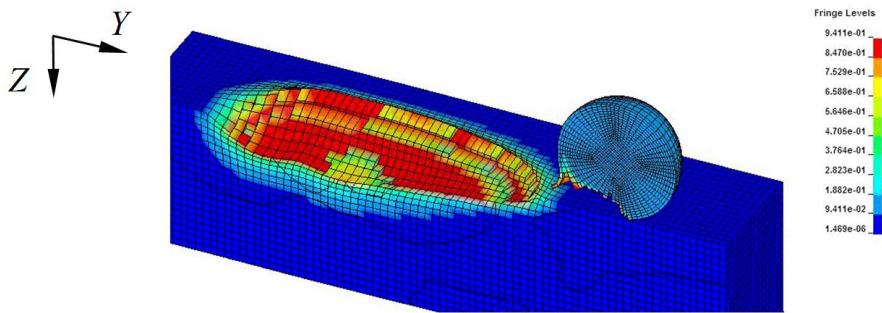
Характеристики		SiC
Плотность		3163
Модуль сдвига, ГПа		183
Прочностные константы:		
A		0.96
B		0.35
C		0
M		1.0
N		0.65
Норма напряжений		1
Максимальная прочность при растяжении, ГПа		0.37
Максимальная сила разрушения, ГПа		0.8
Предел упругости Гогонио, ГПа		14.567
Коэффициенты пластической деформации до разрушения:		
Характеристики		SiC
D1		0.48
D2		0.48
Коэффициенты уравнения состояния:		
K1, ГПа		204.786
K2, ГПа		0
K2, ГПа		0

В качестве материала выбран твердый сплав WC–Co. Физико-механические характеристики, используемые при моделировании материала, приведены в табл. 2.

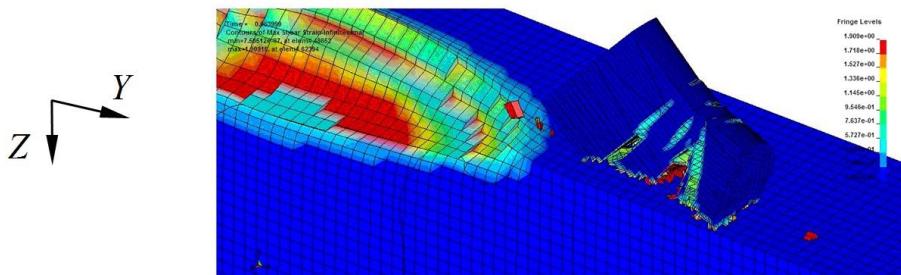
**Таблица 2.** Модель среды (Particulate composite)

Характеристики		Fe
Плотность, кг/м <sup>3</sup>		15770
Модуль Юнга, ГПа		415
Коэффициент Пуассона		0.29
Предел упругости, МПа		1170
Коэффициент упрочнения		2
Степень анизотропии		3
Коэффициенты анизотропии:		
A		1.30
B		1.24
C		0.85
F		0.93
G		0.81
H		0.79

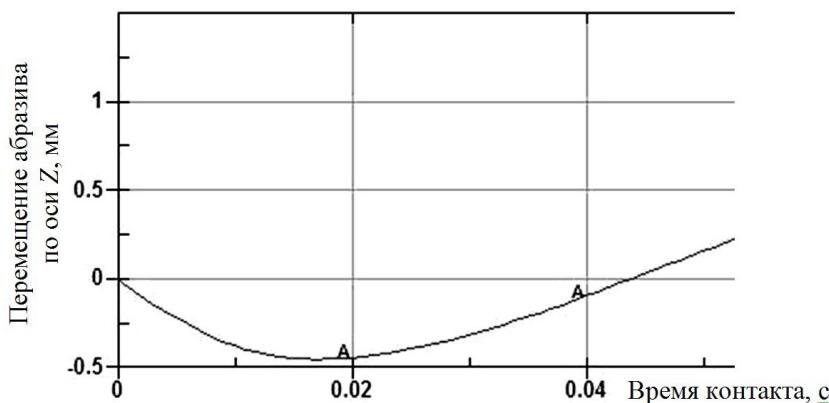
На рис. 5 и 6 представлены результаты моделирования контактного взаимодействия абразива с ПАВ со стенками сопла гидроабразивного станка, а на рис. 7 и 8 – результаты моделирования перемещения абразива по осям  $Z$  и  $Y$  соплового насадка.



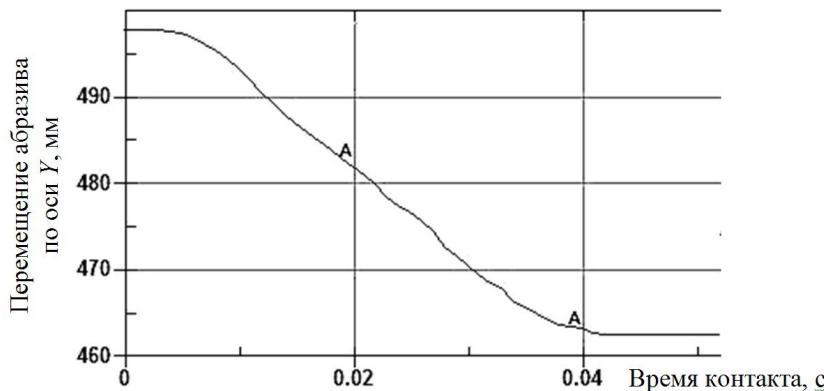
**Рис. 5.** Модель контактного взаимодействия абразива в потоке с ПАВ со стенками сопла гидроабразивного станка: скорость абразива  $v = 500$  м/с, угол контакта  $\alpha = 5^\circ$ , абразив сферический.



**Рис. 6.** Модель контактного взаимодействия абразива в потоке с ПАВ со стенками сопла гидроабразивного станка: скорость абразива  $v = 500$  м/с, угол контакта  $\alpha = 10^\circ$ , абразив цилиндрический.



**Рис. 7.** Перемещение абразива по оси  $Z$  по времени контакта абразива и канала соплового насадка (угол контактного взаимодействия  $\alpha = 5^\circ$ ).



**Рис. 8.** Перемещение абразива по оси  $Y$  по времени контакта абразива и канала соплового насадка (угол контактного взаимодействия  $\alpha = 5^\circ$ ).

**Выводы.** Анализ полученных результатов моделирования позволяет выделить три основных типа контактного взаимодействия абразива в потоке жидкости с ПАВ со стенками соплового насадка гидроабразивного станка и сделать основополагающие выводы. 1. При небольших углах  $\alpha$  контактного взаимодействия абразива со стенкой канала соплового насадка до  $15^\circ$  и невысокой поперечной скорости абразива по оси  $Y$ , примерно от середины движения многофазного потока в сопловом насадке не происходит разрушение абразивной частицы с образованием крупных осколков, а наблюдается только незначительное истирание абразива. 2. При выходе из камеры смешивания сопла, когда угол  $\alpha$  контактного взаимодействия абразива со стенкой канала находится в пределах  $15^\circ - 60^\circ$  отмечается, что часть кинетической энергии абразива расходуется на существенное пластическое деформирование материала конической части канала насадка сопла, возникают волны упругих деформаций в абразиве высокой интенсивности, и, как следствие, абразив разрушается на крупные осколки. 3. При углах  $\alpha$  контактного взаимодействия абразива со стенкой канала соплового насадка  $60^\circ - 90^\circ$ , характерных при выходе частицы из конусной части канала соплового насадка, когда вся кинетическая энергия абразива расходуется на пластическое деформирование материала канала соплового насадка, наблюдаются разрушения абразива на мелкие осколки. Установлено, что канал соплового насадка будет подвержен максимальному разрушению на участке перехода конической части его профиля в цилиндрическую часть примерно на отрезке длины 2.0–2.5 мм.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 23-79-10245.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимова А. М., Галиновский А. Л., Колтаков В. И. Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 9 (666). С. 59–67.  
<https://doi.org/10.18698/0536-1044-2015-9-59-67>
2. Vigneshwaran S., Uthayakumar M., Arumugaprabu V. Abrasive water jet machining of fiber-reinforced composite materials // J. of Reinforced Plastics and Composites. 2017. V. 37. P. 073168441774077.  
<https://doi.org/10.1177/0731684417740771>

3. *Supriya S. B., Srinivas S.* Machining Capabilities of Abrasive Waterjet on Stainless Steel 304 // Applied Mechanics and Materials. 2019. V. 895. P. 313–318.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.895.313>
4. *Li M., Su T., Lin X.* Surface formation and kerf characteristics during single-pass abrasive waterjet slotting of hybrid CFRP/metalllic stacks // CIRP J. of Manuf. Sci. and Technology. 2023. V. 41. P. 94–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.017>
5. *Barsukov G., Zhuravleva T., Kozhus O.* Water-Jet Cutting of Fiberglass Sheet // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. P. 963–965.  
<https://doi.org/10.3103/S1068798X20110040>
6. *Wang S., Hu D., Yang F., Lin P.* Investigation on kerf taper in abrasive waterjet machining of aluminium alloy 6061-T6 // J. of Material Research and Technology. 2021. V. 15. P. 427.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.012>
7. *Vu N., Tuan N.* A Study on Nozzle Wear Modeling in Abrasive Waterjet Cutting // Advanced Materials Research. 2009. P. 76–78.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.76-78.345>
8. *Li Q., He K., Du R.* Fatigue analysis of pure waterjet nozzle-a CFD and FEA approach // Advanced Materials Research. 2011. P. 328–330.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.1359>
9. *Yu J., Lie G., Hai W. et al.* Theoretical and Experimental Analysis of the Influence of Abrasives on Nozzle in Pre-Mixed Abrasive Water Jet // Applied Mechanics and Materials. 2012. P. 425–428.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.233.425>
10. Тищенко Л. А., Ковалев А. А., Шашурина В. Д. и др. Исследование износа соплового насадка и его влияния на производительность гидроабразивной резки // Технология металлов. 2018. № 1. С. 27–346.
11. Галиновский А. Л., Вельтищев В. В., Белов В. А. и др. Экспериментальные исследования по выбору рациональных технологических режимов и параметров гидроабразивного резания в условиях эксплуатации оборудования в подводном положении // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2018. № 7. С. 3–9.
12. Ilukhina A. A., Kolpakov V. I., Veltishchev V. V. et al. The Development of a Physico-Mathematical Model for the Functioning of an Underwater Waterjet Cutting Machine // Moscow University Physics Bulletin. 2020. V. 75. № 2. P. 167.  
<https://doi.org/10.3103/S0027134920020058>
13. Галиновский А. Л., Мусеев В. А., Мугла Д. Р., Белов В. А. Определение рациональной длины фокусирующей трубки для гидроабразивной резки материалов в производстве ракетно-космической техники // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2019. № 4 (265). С. 34–41.  
<https://doi.org/10.14489/hb.2019.04.pp.034-041>
14. Kozhus O., Barsukov G., Zhuravleva T. et al. Modeling of Surfactant Influence on Liquid Velocity in the Channel of the Focusing Tube of the Nozzle of a Waterjet Unit // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2024. P. 765–773.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_71)
15. Кожус О. Г., Галиновский А. Л., Барсуков Г. В. и др. Анализ образования слоя поверхности-активного вещества в канале сопла установки для гидроабразивного резания // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 7. С. 35–41.  
<https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-7-35-41>
16. Погрибный В. Б., Стрельникова Е. А., Шувалова Ю. С. Численное решение уравнений Навье–Стокса методом конечных объемов на структурированной сетке с гибкими границами // Вестник Херсонского национального технического университета. 2014. № 3 (50). С. 413–417.
17. Abdelwahed M., Bade R., Chaker H. et al. On the study of three-dimensional compressible Navier–Stokes equations // Boundary Value Problems. 2024. V. 84. С. 84.  
<https://doi.org/10.1186/s13661-024-01893-9>

18. Зуев Ю. В. Об использовании критерия Стокса при математическом моделировании двухфазных струйных течений // Ученые записки Казанского университета. Серия. Физико-математические науки. 2019. Т. 161. № 3. С. 341–354.  
<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2019.3.341-354>
19. Бубнов М. А., Тищенко Л. А., Ковалев А. А. Исследование процессов гидроабразивной резки и изнашивания режущего инструмента с помощью продуктов ANSYS // САПР и графика. 2014. № 6 (212). С. 44–45.