

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9

doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-22-32

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНОСА ФОКУСИРУЮЩЕЙ ТРУБКИ СОПЛА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВВЕДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Ольга Геннадьевна Кожус¹, Геннадий Валерьевич Барсуков^{2✉}, Егор Дмитриевич Ноздрин³, Елизавета Алексеевна Тинякова⁴, Полина Никитична Зенкина⁵

^{1,2,3} Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, Орел, Россия

⁴ Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

⁵ Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹okozhus@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5942-652X>

²awj@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0436-4429>

³e.nozdrin@outlook.com

⁴grtea2017@yandex.ru

⁵sidorov.35mz@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты анализа закономерностей износа фокусирующей трубки сопла гидроабразивной установки при введении поверхностно-активных веществ (ПАВ). Описаны примененные методы, подходы и особенности организации экспериментальных исследований. Проанализирован процесс формирования волнообразного рельефа внутри канала фокусирующей трубки в зависимости от продолжительности работы сопла. Приведены данные об измерении областей эрозии канала трубки на начальных, промежуточных и заключительных участках. Выявлено, каким образом введение поверхностно-активных веществ

(ПАВ) в поток жидкости воздействует на степень износа, форму и траекторию разрушения стенок канала фокусирующей трубки. Представлены результаты оценки интенсивности уноса материала канала по временному фактору и коэффициенту потери массы. Сформулированы рекомендации по улучшению конструкции фокусирующей трубки для эффективного использования ПАВ в процессах гидроабразивной резки.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, фокусирующая трубка, сопло, струя, износ, поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Финансирование: исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 23-79-10245.

Ссылка для цитирования:

Кожус О.Г. Закономерности износа фокусирующей трубки сопла гидроабразивной установки при введении поверхностно-активных веществ / О.Г. Кожус, Г.В. Барсуков, Е.Д. Ноздрин, Е.А. Тинякова, П.Н. Зенкина // Транспортное машиностроение. – 2026. – № 5. – С. 22-32. doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-22-32.

Original article

Open Access Article

WEAR FEATURES OF THE NOZZLE FOCUSING TUBE OF THE HYDROABRASIVE INSTALLATION WHEN INTRODUCING SURFACTANTS

Olga Gennadievna Kozhus¹, Gennady Valerievich Barsukov^{2✉}, Egor Dmitrievich Nozdrin³, Elizaveta Alekseevna Tinyakova⁴, Polina Nikitichna Zenkin⁵

^{1,2,3} Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

⁴ Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia

⁵ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹okozhus@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5942-652X>

²awj@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0436-4429>

22

© Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Ноздрин Е.Д., Тинякова Е.А., Зенкина П.Н., 2026

³ e.nozdrin@outlook.com

⁴ grtea2017@yandex.ru

⁵ sidorov.35mz@mail.ru

Abstract

The paper presents the analysis results of wear features of the nozzle focusing tube of a hydroabrasive installation when introducing surfactants. The applied methods, approaches and features of arranging experimental research are described. The wave-like relief formation inside the channel of the focusing tube is analyzed, depending on the duration of the nozzle operation. Data on the measurement of the erosion areas of the tube channel in the initial, intermediate and final sections are presented. It is found out how the introduc-

tion of surfactants into the liquid flow affects the degree of wear, shape and trajectory of destruction of the focusing tube channel walls. The results of estimating the intensity of channel material entrainment by the time factor and the mass loss coefficient are presented. Recommendations are given to improve the design of the focusing tube for the effective use of surfactants in hydroabrasive cutting.

Keywords: hydroabrasive cutting, focusing tube, nozzle, jet, wear, surfactants.

Funding: the paper is funded by the Russian Science Foundation Project No. 23-79-10245.

Reference for citing:

Kozhus OG, Barsukov GV, Nozdrin ED, Tinyakova EA, Zenkina PN. Wear features of the nozzle focusing tube of the hydroabrasive installation when introducing surfactants. *Transport Engineering*. 2026;5:22-32. doi: 10.30987/2782-5957-2026-5-22-32.

Введение

Современная обрабатывающая промышленность активно применяет гидроабразивное резание, что делает ее одной из наиболее популярных технологий в мире. Аналитики из Research and Markets прогнозируют, что объем российского рынка гидроабразивного резания достигнет 500 миллиардов рублей в 2026 году, при этом среднегодовой темп роста составит от 10% до 12%. Такая динамика обусловлена растущей потребностью в методах обработки различных материалов с высокой точностью и производительностью [1].

Гидроабразивное резание пользуется высоким спросом благодаря своим преимуществам перед традиционными методами обработки. В некоторых ситуациях она становится безальтернативным способом изготовления деталей из таких материалов, как керамика, композиты, многослойные и сотовые конструкции. Основными сферами применения гидроабразивной резки являются машиностроение (30% рынка), где она используется для производства деталей из стали, алюминия, титана и других металлов; авиастроение (20%), применяющее эту технологию для резания композитов, сплавов алюминия и титана; судостроение (15%), где она используется для обработки нержавеющей стали, алюминия и композитов в кон-

струкции судов и прочих элементов; строительство (10%), где резка стекла, камня, керамики и прочих материалов находит применение в строительстве и отделке; производство оборудования (25%).

В процессе гидроабразивного резания сопло является одним из наиболее важных компонентов обработки. Его износ представляет значительную проблему, так как сказывается на качестве режущей поверхности и эффективности всего процесса [2].

Принцип работы соплового устройства (рис. 1) основан на подаче воды насосом под давлением примерно 400 МПа к сапфировому соплу, которое формирует высокоскоростную струю 5, имеющую скорость около 800 м/с. По мере прохождения струи через зону смешивания за счет эффекта Вентури в камере 3 создается разрежение. Это разрежение способствует захвату абразивных частиц 2 из канала 4. Смешанные в камере 3 частицы 2 направляются в фокусирующую трубку 6. На начальном участке 1 трубки 6 они ускоряются до момента выхода из сопла. В итоге формируется гидроабразивная струя, применяемая для резки. Материалами для изготовления фокусирующей трубки 6 служат карбид кремния, карбид кобальта, карбид

бид вольфрама, карбид бора или керамические составы [3].

Механизмы износа канала фокусирующей трубки меняются от эрозии на входе [4] к истиранию и усталостному разрушению на нижележащих участках [2]. Критическое изменение диаметра канала трубки, обусловленное изнашиванием, достигает 100 % уже через 80 минут рабочего времени [5]. Установлено, что осевая скорость абразива в изношенной трубке снижается в 1,5...2 раза по сравнению с трубкой без наработки [2].

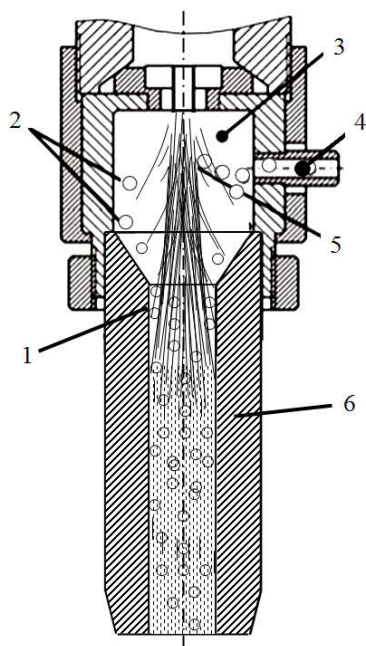


Рис. 1. Гидроабразивное сопло:

- 1 – начальный участок разгона абразивных частиц;
- 2 – абразивные частицы; 3 – камера смешивания;
- 4 – канал входа абразива; 5 – струя жидкости;
- 6 – фокусирующая трубка

Fig. 1. Waterjet nozzle:

- 1 – the initial section of acceleration of abrasive particles;
- 2 – abrasive particles; 3 – mixing chamber;
- 4 – abrasive inlet channel; 5 – liquid jet;
- 6 – focusing tube

В рамках проведенных экспериментальных работ *Hashish M.* [6] изучил особенности возникновения износа фокусирующей трубки сопла, сопоставляя наблюдаемые изменения с показателями твердости и ударной вязкости материала, из которого была изготовлена трубка. В другом исследовании, выполненном *Nanduri M.* [7] также с применением экспериментальных методов, было проанализировано, каким

образом геометрические характеристики трубки влияют на степень ее износа. Определено, что в цилиндрическом канале трубки формируется последовательность волн, характеризующихся увеличением радиуса. Волновая структура износа нарастает по амплитуде и распространяется вдоль канала с увеличением времени работы сопла.

Введение поверхностно-активных веществ (ПАВ) в виде порошка, смешанного с абразивными частицами, ускоряет их движение в фокусирующей трубке, увеличивая скорость на 10...15 %, что позволяет улучшить качество гидроабразивного резания и повысить ее производительности [8].

При отсутствии ПАВ в движущейся жидкости максимальная скорость, достигаемая на выходе из фокусирующей трубки, равна 260 м/с. В тоже время, с добавлением ПАВ, которые снижают гидравлическое сопротивление у стенок, этот показатель увеличивается на 18 %, достигая 290 м/с [9]. Данное явление обусловлено известным эффектом снижения сопротивления потока в трубопроводах гидравлических систем при добавлении полимеров и ПАВ [10].

Однако в присутствии ПАВ структурные характеристики потока внутри фокусирующей трубки сопла претерпевают изменения. В случае гидроабразивного потока, содержащего ПАВ, наблюдается увеличение толщины пристенной области. Это утолщение затрагивает как ламинарный слой, прилегающий непосредственно к внутренней поверхности канала трубки, так и переходную зону, находящуюся между ним и турбулентным ядром потока. В отличие от этого, зона вязкого подслоя остается неизменной. Область вязкого подслоя не деформирована, в то время как промежуточная область, где вязкое и турбулентное трения соизмеримы, профиль скорости деформируется в результате сдвига (проскальзывания) на стенке канала и увеличения размера промежуточной зоны [11].

Эти явления влияют на колебательное движение абразивных частиц в канале трубки, а следовательно на характер ее из-

носа при введении ПАВ. Поэтому в данной работе на основе полученных экспериментальных данных проанализировано влияние ПАВ на характер износа внутреннего

канала трубки сопла. Этот анализ может быть полезен для понимания механизма износа трубки под действием гидроабразивного потока с ПАВ.

Методика экспериментальных исследований

Для исследований использовался трехкоординатный станок с ЧПУ для гидроабразивной резки *Bystronic Vyjet L 4030* (Швейцария). Станок имел следующие характеристики: насос высокого давления 400 МПа, мощность электромотора 41 кВт; система гидроабразивной резки *Bystronic*. Фокусирующая трубка сопла RG100: внешний диаметр 6,35 мм, диаметр отверстия 0,76 мм, длина трубки 76,2 мм. Материал трубки – карбид вольфрама (WC). В качестве абразива применялся гранатовый песок *JH Mining* (Китай) фракции *mesh80* (0,16...0,35 мм). Данный размер абразива считается оптимальным и наиболее подходящим для применения в гидроабразивной резке подавляющего большинства материалов [12]. Также в соответствии с общепринятыми нормами резки углеродистой

или нержавеющей стали, расход абразива составлял 340 г/мин.

Перед экспериментом абразив подвергался предварительному смешиванию в лопастном одновальном смесителе СБ-97МК-300 с анионоактивным ПАВ – лаурилсульфат натрия $C_{12}H_{25}SO_4Na$. Концентрация ПАВ выбрана на уровне 0,1% от массы абразива. Это значение было ранее установлено на основе анализа времени, затрачиваемого на сквозной прокол образца при различных условиях гидроабразивного резания с использованием ПАВ [8].

Для эксперимента использовали 5 фокусирующих трубок. Каждая из них была взвешена до установки в сопло на аналитических весах. Массы исходных трубок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Масса исходной фокусирующей трубки

Table 1

Mass of the initial focusing tube

Номер трубки	1	2	3	4	5
Масса, г	35,228	35,287	35,26	35,299	35,276

Далее трубки устанавливали в сопло поочередно. Согласно исследованиям Тищенко Л.А. [2], трубка начинает заметно изнашиваться приблизительно через 20 часов работы. При этом средний срок ее службы колеблется в пределах 60–100 часов. Исходя из этих данных, были выбраны следующие интервалы времени для оценки износа канала трубки: 24, 40, 48, 56 и 80 часов. После наработки заданного срока работы трубку извлекали, взвешивали и разрезали вдоль оси на электроэрозионном станке. Профили разрезов трубок представлены на рис. 2.

Данные о профиле канала были собраны после измерения геометрических значений по фотографии разрезанных трубок в программе *sPlan 7.0*. Износ оценивался по изменению диаметра канала по

длине трубки, глубины и радиуса кривизны поверхности разрушения.

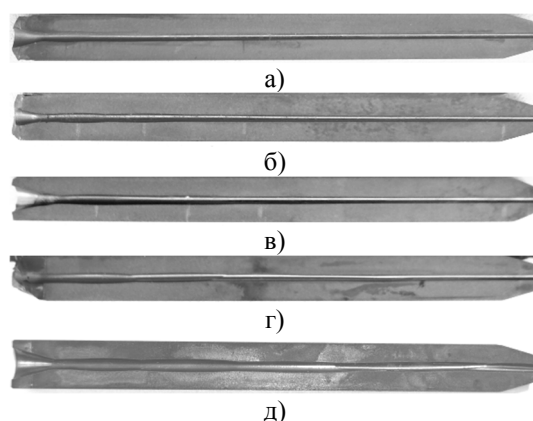


Рис. 2. Профили разрезов фокусирующих трубок поле работы в течение контрольного времени: а – 24 часа; б – 40 часов; в – 46 часов; г – 58 часов; д – 80 часов
 Fig. 2. Profiles of focusing tubes after operation during the control time: a – 24 hours; b – 40 hours; c – 46 hours; d – 58 hours; e – 80 hours

Оценка интенсивности уноса материала канала проводилась по временному фактору. Временной фактор m представляет собой потерю массы фокусирующей трубки в зависимости от времени воздействия абразивного потока [12]. Он рассчитывался по формуле 1:

$$m = \frac{m_t}{t}, \text{ (г/мин)} \quad (1)$$

где m_t – потеря массы фокусирующей трубки, г; t – время воздействия, мин.

Результаты и обсуждение

Профили, представленные на рис. 2, хотя и характеризуют только этапы роста радиуса канала трубки вдоль длины сопла, дают очень хорошее описание развития износа в сопле. Профили, полученные с интервалами в 20, 24, 48, 56 и 80 часов, показали, что по мере износа волновая структура увеличивается по величине и распространяется вниз по каналу сопла.

Изучая снимки продольных срезов трубок (рис. 2), можно заметить, что по внутренней поверхности канала сформировалось множество волн. Эта волнообразная структура более четко видна на рис. 3, на котором представлено изменение радиуса канала трубки на входе абразива с ПАВ после 24 часов работы на начальном участке разгона абразива (рис. 1).

Установлено, что в присутствии ПАВ эрозия внутренней поверхности трубки носит рассеивающийся характер. От этого типа эрозии зависит результативность переноса энергии от водного потока к абра-

Уменьшение массы фокусирующей трубки оценивали по значению коэффициента потери массы ΔM в соответствии с формулой 2 [12]:

$$\Delta M = \frac{m}{m_a}, \text{ (г/кг)} \quad (2)$$

где m – временной фактор, г/мин; m_a – расход абразива, кг/мин.

зивным частицам. Наибольший диаметр канала после 80 часов работы находится в выходной зоне на длине 65 мм, радиус которого составляет 1,46 мм.

В смесительной камере сопла (рис. 1) наблюдается значительный градиент скоростей между абразивными частицами и водой, что порождает множество локальных вихрей в процессе их взаимодействия. На начальной стадии ускорения абразива уровень турбулентности чрезвычайно высок, что вызывает сильные возмущения траекторий частиц, которые приобретают беспорядочный характер. Это, в свою очередь, приводит к отклонению движения абразивных частиц от общего потока жидкости. В результате происходит контакт абразива со стенками канала под острыми углами, варьирующимися в пределах от 1° до 5° (рис. 3, 4). Такое явление оказывает существенное влияние на интенсивность износа входной части канала в начальный период работы.

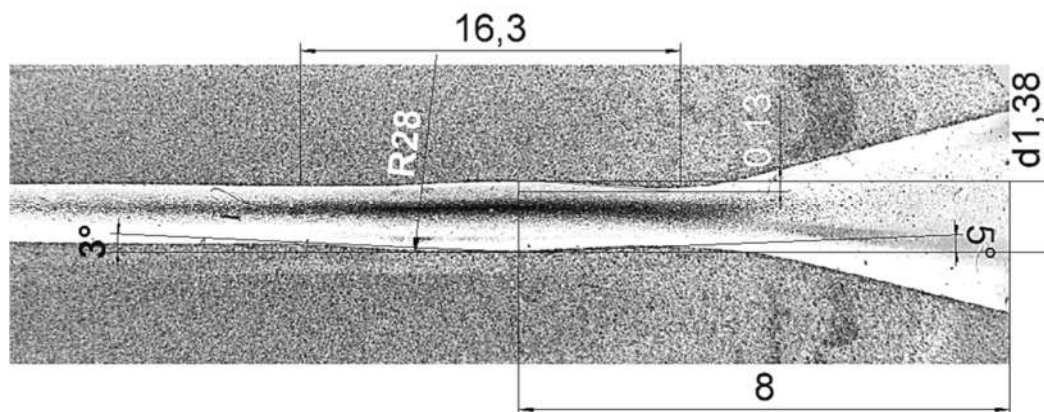


Рис. 3. Канал фокусирующей трубки на входе абразива с ПАВ после 24 часов работы
Fig. 3. Channel of the focusing tube at the inlet of the abrasive with surfactant after 24 hours of operation

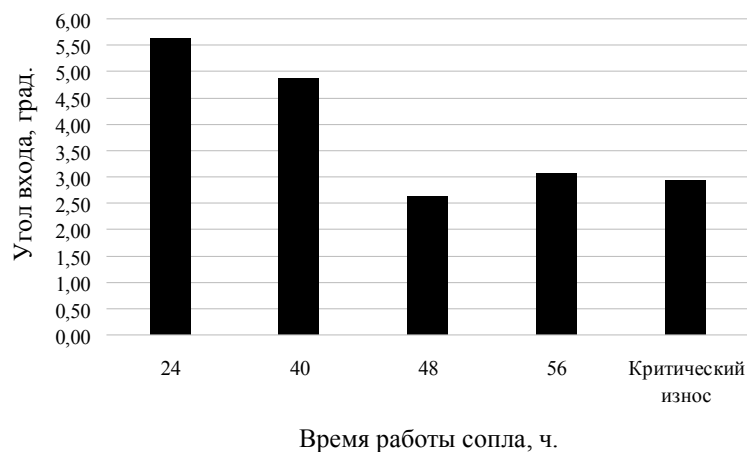


Рис. 4. Усредненные значения угла контакта абразива со стенкой канала фокусирующей трубки от времени работы сопла
 Fig. 4. Average values of the angle of the abrasive contact with the channel wall of the focusing tube as a function of the nozzle operation time

После 40 часов работы масштабы разрушения канала трубки продолжают расти. Признаки износа появляются в средней части фокусирующей трубки (рис. 5). Это связано с тем, что на входе в трубку формируется вогнутый участок канала, где скорости и давления распределяются неравномерно (рис. 6), что приводит к возникновению поперечного перепада давления. Абразивные частицы, перемещаясь в пристеночном слое, подвергаются воздействию этой разницы давлений. Поскольку их скорость совпадает с основным направлением потока жидкости незначительно, они изнашивают часть стенки канала в центре. Этот контакт осуществляет-

ся под малыми углами, которые, как правило, находятся в диапазоне от 1° до 4° . Вдоль участка канала с вогнутой стенкой поток ведет себя как в сужающемся сопле, а вдоль участка с выпуклой стенкой как в расширяющемся диффузоре. При этом частицы, находящиеся ближе к стенке, испытывают большее отклонение, чем те, что расположены дальше. В соответствии с принципом неразрывности потока, в центральной части формируются ответные течения, направленные к внешней стороне канала. Это, в свою очередь, порождает вторичное вихревое движение, которое насаивается на основной поток.

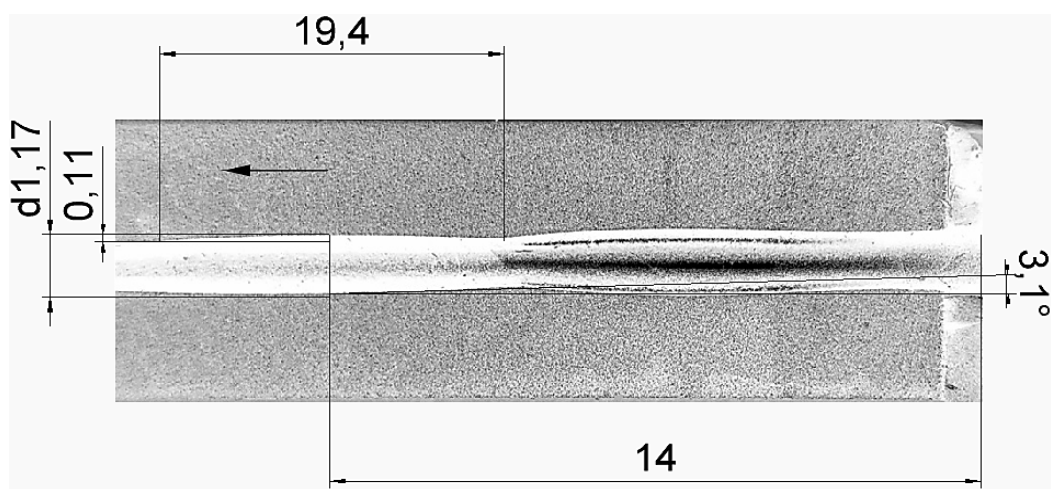


Рис. 5. Канал фокусирующей трубки после 40 часов работы (входной и центральный участок)
 Fig. 5. Focusing tube channel after 40 hours of operation (entrance and central sections)

Таким образом, абразивный износ является основным механизмом, приводящим к разрушению канала трубки. Наибольший диаметр канала составил 1,46 мм при длине 65 мм. При длине 40 мм этот показатель достиг 1,26 мм, а для участка длиной 20 мм – 0,93 мм. Этот процесс

можно условно разделить на три участка вдоль длины трубки: входной, средний и выходной. Исследование профилей износа показывает, что наиболее выраженная эрозия наблюдается на входе в фокусирующую трубку.

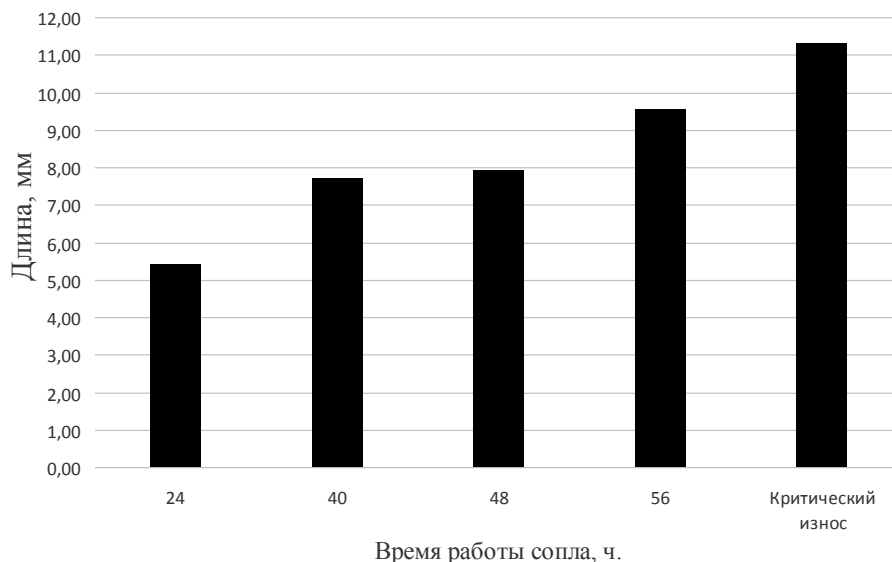


Рис. 6. Усредненные значения длины «бочки» в канале фокусирующей трубки от времени работы сопла

Fig. 6. Average values of the length of the "barrel" in the channel of the focusing tube as a function of the nozzle operation time

Это связано с тем, что абразивные частицы концентрируются в этой области в большей степени, чем в средней части и на выходе. Далее, в центральной части трубки абразивные частицы, сталкиваясь со стенками сопла, вызывают его износ, но в меньшей степени, чем на входе. В заключительной фазе вблизи выходного отверстия трубки частицы абразива достигают максимальной скорости в потоке жид-

кости, содержащей ПАВ: скорость абразива становится равной 290 м/с [9], что приводит к росту интенсивности износа и изменению формы канала. Вследствие этих обстоятельств происходит трансформация характера эрозии на выходе, эффект от которой явно прослеживается на срезах канала трубки по истечении 80 часов эксплуатации (рис. 7).

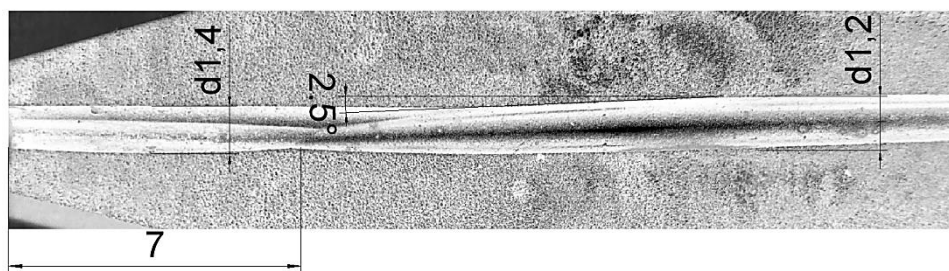


Рис. 7. Выходная часть канала фокусирующей трубки после 80 часов работы

Fig. 7. Outlet part of the focusing tube channel after 80 hours of operation

Из-за сужения канала после вогнутого участка в середине трубки абразивные частицы далее воздействуют на цилиндрическое отверстие с высокой осевой скоростью.

Лиофильные молекулы ПАВ в гидроабразивном потоке, обладающие дипольными группами, притягиваются к стенке канала сопла, формируя на ней адсорбционный слой. Это явление приводит к снижению вязкости на стенках выходного участка канала трубки сопла, что, в свою очередь, ускоряет пристеночный гидроабразивный поток [11]. Из-за относительно равной скорости абразива и водяной струи с ПАВ частицы не только попадают в центральную зону струи, но и способны проникать через поток, ударяя в противоположную стенку (рис. 7).

Вследствие интенсивной турбулентности, возникающей при прохождении абразива через данную зону, возрастает скорость движения частиц в радиальном направлении, что, в свою очередь, усиливает эрозионный износ канала трубки в его выходной части (рис. 7). Так как молекулы ПАВ способствуют снижению коэффициента вязкости на стенке канала фокусирующей трубки сопла, который определяется состоянием течения (ламинарное или тур-

булентное) и взаимодействием рабочей среды с твердой стенкой канала (прилипание или проскальзывание), то точка отрыва пограничного потока располагается перед экваториальным сечением, а вылет частиц происходит под углом $\alpha = 80 - 85^\circ$ к направлению потока (рис. 8).

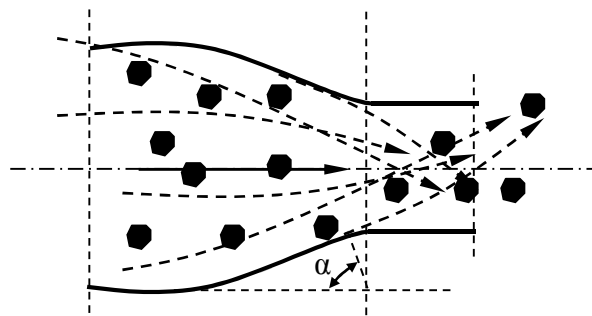


Рис. 8. Схема движения гидроабразивного потока с ПАВ на выходном участке фокусирующей трубки
Fig. 8. Diagram of the hydroabrasive flow with surfactants at the outlet section of the focusing tube

На рис. 9 представлена зависимость между потерей массы фокусирующей трубки m_t и соответствующим временем работы t при использовании гранатового абразива, содержащего ПАВ в концентрации 0,1% от массы абразива.

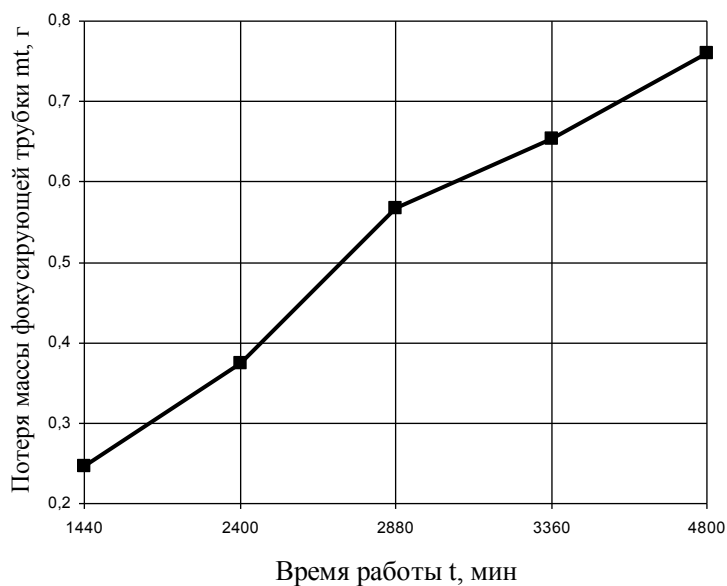


Рис. 9. Зависимость между потерей массы фокусирующей трубки и соответствующим временем работы в присутствии ПАВ
Fig. 9. Dependence between the mass loss of the focusing tube and the corresponding operating time in the presence of surfactants

Снижение веса фокусирующей трубки почти прямо пропорционально продолжительности её использования, и, следовательно, его динамика может быть использована для прогнозирования износа. Максимальная потеря массы, зафиксированная при 4800 минутах (80 часах) эксплуатации, достигла 0,76 грамма, что эквивалентно примерно 2,3% от первоначального веса трубки (рис. 9). Табл. 2 содержит результа-

ты расчёта временного фактора износа на основе формулы (1) и коэффициента потери массы ΔM по (2). Наиболее активное уменьшение массы фокусирующей трубки происходит в середине её рабочего цикла, составляя 0,00019 г/мин. Именно в этот период в центральной части канала трубки формируются участки с криволинейным профилем.

Таблица 2

Характеристики износа фокусирующей трубки в присутствии ПАВ

Table 2

Wear characteristics of the focusing tube in the presence of surfactants

Время работы t , мин	1440	2400	2880	3360	4800
Временной фактор износа m , г/мин	0,00017	0,00015	0,00019	0,00019	0,00015
Коэффициент потери массы ΔM , г/кг	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0004

Вторым по значимости периодом интенсивного износа материала трубки является начальная стадия эксплуатации в первые 1440 минут (24 часа) работы с показателем 0,00017 г/мин. Это обусловлено активным истиранием входной части канала из-за сильных возмущений, вызывающих хаотичное движение частиц. Минимальная потеря массы трубки 0,00015 г/мин наблюдается к концу её рабочего ресурса,

к 4800 минутам (80 часам). На этом этапе профиль канала износа уже установлен, и происходит его равномерное истирание с увеличением внутреннего диаметра. Коэффициент потери массы ΔM практически постоянный во время работы сопла. Этот параметр колеблется в диапазоне от 0,0004 до 0,0005 г/кг при условии, что скорость подачи абразива составляет 0,340 килограмма в минуту.

Заключение

Профили износа фокусирующей трубки сопла гидроабразивной установки при введении ПАВ, полученные с интервалами в 20, 24, 48, 56 и 80 часов, показали, что по мере износа формируется волновая структура, которая распространяется вниз по каналу сопла. Этот процесс можно условно разделить на три участка вдоль длины трубки: входной, средний и выходной. На начальной стадии ускорения абразива уровень турбулентности чрезвычайно высок, что вызывает сильные возмущения траекторий частиц и приводит к отклонению их движения от общего потока жидкости. На этом участке временной фактор m оказался вторым по значимости периодом интенсивного износа материала трубки с показателем 0,00017 г/мин. После 40 часов работы масштабы разрушения канала трубки растут. Признаки износа появляются в средней части фокусирующей

трубки. Зафиксировано наиболее активное уменьшение массы фокусирующей трубки $m = 0,00019$ г/мин. На выходном участке вблизи выходного отверстия трубки частицы абразива достигают максимальной скорости в потоке жидкости 290 м/с. Это приводит к росту интенсивности износа и изменению формы выходного канала. Абразивные частицы не только воздействуют на ядро струи, но и способны проникать через поток, ударяя в противоположную стенку. На этом этапе профиль канала износа уже установлен, и происходит его равномерное истирание с увеличением внутреннего диаметра.

Таким образом, верхняя и средняя области фокусирующей трубки подвергаются более интенсивному износу при наличии ПАВ по сравнению с нижней частью. Характер повреждения канала вплоть до выходного отверстия трубки со-

ответствует предыдущим публикациям других исследователей [2, 3, 12]. В данном исследовании выявлено, что добавление ПАВ в жидкостный поток увеличивает интенсивность износа, а также изменяет профиль и направление эрозии стенок канала в выходной зоне. При этом использование ПАВ соответствует времени службы фокусирующей трубки 80...100 часов, что сопоставимо с показателями ее работы без

применения этих добавок. Увеличить работоспособность трубки возможно за счет модификации ее геометрии. Например, повышение угла входного отверстия позволит увеличить осевое ускорение частиц, что, в свою очередь, может облегчить проникновение абразивных частиц в фокусирующую трубку. Это приведет к сокращению времени их контакта со стенками и уменьшению износа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kartal, Fuat, Kaptan Comprehensive and essential review of advanced researches abrasive waterjet machining. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. – 2025. DOI: 9. 50-69. 10.35860/iarej.1582470.
2. Тищенко Л.А. Износ соплового насадка в технологических системах гидроабразивной обработки материалов // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2013. №11.
3. Nanduri M., Taggart D., Kim T. A Study of Nozzle Wear in Abrasive Entrained Water Jetting Environment. *Journal of Tribology-transactions of The Asme - J TRIBOL-TRANS ASME*. – 2000. DOI: 122. 10.1115/1.555383.
4. Zou X., Fu, L., Wu L., Zuo W. Research on Multiphase Flow and Nozzle Wear in a High-Pressure Abrasive Water Jet Cutting Head. *Machines*. 11. 614. – 2023. DOI: 10.3390/machines11060614.
5. Nuraini L., Gusti C., Mebrahitom G. A Scientometrics Review of Nozzle Wear in Abrasive Waterjet Machining. – 2025. DOI: 10.1007/978-981-96-4353-0_36.
6. Hashish M. Observation of wear of abrasive-waterjet nozzle materials // *Journal of Tribology* 116. – 1994. pp. 439-444.
7. Nanduri M., Taggart D.G., Kim T.J. A Study of Nozzle Wear in Abrasive Entrained Water Jetting Environment *Journal of Tribology*. - Vol 122. – 2000. - pp 465.
8. Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Журавлева Т.А., Петрухин А.В., Бондаренко М.Э., Клепова В.Н.

- Зависимости времени сквозного прокола обрабатываемого материала от основных режимов гидроабразивного резания при наличии ПАВ // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2025. № 3 (371). С. 61-67.
9. Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Галиновский А.Л., Журавлева Т.А., Петрухин А.В. Моделирование движения гидроабразивного потока с ПАВ в канале сопла гидроабразивного станка // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2025. № 6. С. 33-40.
 10. Yang C., Pengyuan N., Minglan He, Changjun Li, Turbulent drag reduction behavior of polymer solutions in different geometries, *Energy*, Volume 323, 2025, 135798, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135798>.
 11. Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Галиновский А.Л., Тинякова Е.А., Петрухин А.В. Анализ образования слоя поверхностно-активного вещества в канале сопла установки для гидроабразивного резания // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. №7. 2024. С. 35-41
 12. Pereg A., Pude F., Grigoryev A., Kaufeld M., Wegener K. A study of wear on focusing tubes exposed to corundum-based abrasives in the waterjet cutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. DOI:104. 10.1007/s00170-019-03971-0.

REFERENCES

1. Kartal, Fuat, Kaptan Comprehensive and essential review of advanced researches abrasive waterjet machining. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 2025. DOI: 9. 50-69. 10.35860/iarej.1582470.
2. Tishchenko L.A. Wear of the nozzle in technological systems of hydroabrasive treatment of materials. *Mashinostroenie i Kompjuternye Tehnologii*. 2013;11.
3. Nanduri M, Taggart D, Kim T. A Study of Nozzle Wear in Abrasive Entrained Water Jetting Environment. *Journal of Tribology-transactions of*

- The Asme. J TRIBOL-TRANS ASME*. 2000. DOI: 122. 10.1115/1.555383.
4. Zou X, Fu L, Wu L, Zuo W. Research on Multiphase Flow and Nozzle Wear in a High-Pressure Abrasive Water Jet Cutting Head. *Machines*. 2023;11:614. DOI: 10.3390/machines11060614.
 5. Nuraini L, Gusti C, Mebrahitom G. A Scientometrics Review of Nozzle Wear in Abrasive Waterjet Machining. 2025. DOI: 10.1007/978-981-96-4353-0_36.

6. Hashish M. Observation of wear of abrasive-waterjet nozzle materials. *Journal of Tribology* 116. 1994;439-444.
7. Nanduri M, Taggart DG, Kim TJ. A Study of Nozzle Wear in Abrasive Entrained Water Jetting Environment *Journal of Tribology*. 2000;122:465.
8. Barsukov GV, Kozhus OG, Zhuravleva TA, Petrukhin AV, Bondarenko ME, Klepova VN. Dependence of the time of through-piercing of the mashed material on the main modes of waterjet cutting in the presence of surfactants. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2025;3(371):61-67.
9. Barsukov GV, Kozhus OG, Galinovsky AL, Zhuravleva TA, Petrukhin AV. Modeling the movement of a waterjet flow with surfactants in the nozzle channel of a waterjet machine. *Polymer Science, Series D*. 2025;6:33-40.
10. Yang C, Pengyuan N, Minglan He, Changjun Li, Turbulent drag reduction behavior of polymer solutions in different geometries. *Energy* [Internet]. 2025;323:135798. Available from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135798>.
11. Barsukov GV, Kozhus OG, Galinovsky AL, Tinyakova EA, Petrukhin AV. Analysis of the formation of a surfactant layer in the nozzle channel of a waterjet cutting machine. *Polymer Science, Series D*. 2024;7:35-41.
12. Perec A, Pude F, Grigoryev A, Kaufeld M, Wegener K. A study of wear on focusing tubes exposed to corundum-based abrasives in the waterjet cutting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. DOI:10.1007/s00170-019-03971-0.

Информация об авторах:

Кожус Ольга Геннадьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», тел. +79102668598.

Барсуков Геннадий Валерьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Передовые производственные технологии», тел. +79103066171.

Kozhus Olga Gennadievna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at New Abrasive Materials Research Laboratory, phone: +79102668598.

Barsukov Gennady Valerievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Advanced Manufacturing Technologies Research Laboratory, phone: +79103066171.

Ноздрин Егор Дмитриевич – лаборант научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», тел. +79538177065

Тинякова Елизавета Алексеевна – лаборант научно-исследовательской лаборатории «Новые абразивные материалы», тел. +79606550077.

Зенкина Полина Никитична – студент, тел. +79158939567.

Nozdrin Egor Dmitrievich – Laboratory assistant at New Abrasive Materials Research Laboratory, phone: +79538177065

Tinyakova Elizaveta Alekseevna – Laboratory assistant at New Abrasive Materials Research Laboratory, phone: +79606550077.

Zenkina Polina Nikitichna – Student, phone: +79158939567.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 21.03.2026; одобрена после рецензирования 09.04.2026; принята к публикации 27.04.2026. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 21.03.2026; approved after review on 09.04.2026; accepted for publication on 27.04.2026. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.