

УДК 621.22.011; 621.7-97; 620.169.1

Численное моделирование сверхнизкотемпературного воздействия на гидроабразивные фокусирующие трубки^{*}

А.Л. Галиновский, П.В. Круглов, М.А. Янко, Н.А. Изотов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Numerical simulation of the ultra-low-temperature effect on the waterjet focusing tubes

A.L. Galinovskiy, P.V. Kruglov, M.A. Yanko, N.A. Izotov

Bauman Moscow State Technical University

Гидроабразивная резка — универсальный метод обработки конструкционных материалов, широко применяемых в различных отраслях промышленности. Исследование перспективных модификаций технологического процесса ультраструйной обработки с целью повышения эффективности является актуальной задачей. Изучена возможность захлаживания фокусирующей трубки при ультраструйной обработке для повышения эрозионной устойчивости струеформирующих элементов путем формирования защитной ледяной пленки. Предложена перспективная конструкция двухконтурного спирального теплообменника для лучшего отвода теплоты от элементов гидроабразивной установки, подверженных эрозионному износу. Рассмотрена краевая задача криогенного теплообмена и теплового баланса. Приведены результаты математического моделирования криогенного охлаждения фокусирующей трубки методом конечных элементов в специализированной программной среде для двух различных конструкций теплообменников. Достигнуто существенное улучшение градиента температур материала фокусирующей трубки по сравнению с конфигурационным аналогом теплообменника. Значительно снижен перепад температур в материале фокусирующей трубки двухконтурного спирального теплообменника по сравнению с таковым в аналоге.

EDN: BLQZVW, <https://elibrary/blkzvw>

Ключевые слова: теплообменник, гидроабразивная ультраструя, фокусирующая трубка, криогенное захлаживание, математическое моделирование

Waterjet cutting is a universal method in machining the structural materials widely used in various industries. The study of promising modifications in the ultra-jet machining technology to increase its efficiency is a pressing problem. The paper studies a possibility of cooling the focusing tube in the ultra-jet machining to increase erosion resistance of the jet-forming elements by forming a protective ice film to preserve the tube. It proposes a promising design of the double-circuit spiral heat exchanger to ensure better heat removal from the waterjet system elements subject to the erosive wear. The boundary value problem of the cryogenic heat transfer and heat balance is considered. Mathematical simulation results of focusing the tube cryogenic cooling using the finite element method in the specialized soft-

^{*} Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» при МГТУ им. Н.Э. Баумана).

ware environment of two different heat exchanger designs are presented. Temperature gradient of the focusing tube material is noticeably improved in comparison with the heat exchanger configuration analog. Temperature difference in the focusing tube material is reduced significantly compared to the previous heat exchanger design.

EDN: BLQZVW, <https://elibrary/blkzvw>

Keywords: heat exchanger, hydroabrasive ultra-jet, focusing tube, cryogenic cooling, mathematical simulation

Основными элементами гидроабразивной установки, подверженными износу, являются фокусирующие трубки (ФТ) и гидросопла (насадки). Доля стоимости сопел в общей себестоимости гидроабразивной обработки (ГАО) составляет примерно 15 % [1]. Для поддержания ГАО на требуемом уровне качества важно сохранять размер и форму струеформирующего канала ФТ в допустимых пределах [2]. Согласно данным работ [3–5], криогенное захлаживание ФТ гидроабразивных станков может давать положительные эффекты в части снижения эрозионного износа за счет формирования ледяной пленки на стенках струеформирующего тракта.

Цель работы — исследование возможности повышения эрозионной устойчивости струеформирующих элементов (ФТ) при ГАО путем криогенного охлаждения, а также разработка и оптимизация конструкции (теплообменного аппарата) теплообменника для эффективного отвода теплоты от ФТ.

Разработка и проектирование теплообменника. Для доставки хладагента в зону активной эрозии спроектирован теплообменник в виде витой полый трубки (змеевика) [6], снаружи охватывающей гидроабразивное сопло (рис. 1). В такой конструкции шаг витков элемента охлаждения уменьшается в направлении выходного отверстия гидроабразивного сопла.

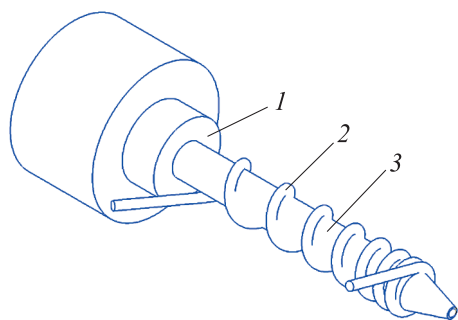


Рис. 1. Схема теплообменника-змеевика, смонтированного на гидроабразивной головке станка:

1 — корпус станка ГАО; 2 — теплообменник-змеевик; 3 — ФТ

Предполагалось, что при прокачивании хладагента (жидкого азота) через теплообменник-змеевик градиентно увеличивается количество отводимой теплоты. Благодаря такому охлаждению на внутренней стенке канала ФТ образуется конусообразная ледяная пленка. Вследствие неравномерности шага витков теплообменника-змеевика ФТ охлаждается дискретно, и образуется ледяная пленка переменной толщины, которая увеличивается в сторону выходного отверстия гидроабразивного сопла (рис. 2).

В процессе эксплуатации гидроабразивного станка ледяная пленка постепенно разрушается высокоскоростной струей хладагента и обновляется за счет продолжающегося процесса охлаждения. Наличие ледяной пленки защищает канал ФТ от износа, а также сужает диаметр выходного отверстия гидроабразивного сопла, что уменьшает толщину струи хладагента и положительно влияет на точность обработки заготовки [7–9].

Основным недостатком такой конструкции является минимальная площадь контакта (геометрически представляющая собой винтовую линию исчезающе малой толщины) между теплообменником и ФТ, а следовательно, минимальный коэффициент полезного действия.

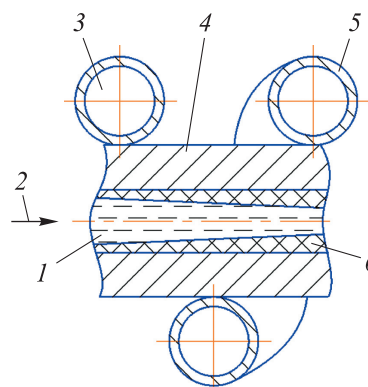


Рис. 2. Схема ФТ и теплообменника-змеевика в продольном сечении:

1 — внутренний канал ФТ; 2 — направление движения гидроабразивной ультраструи; 3 — полость циркуляции хладагента; 4 — корпус ФТ; 5 — корпус теплообменника-змеевика; 6 — воронкообразная ледяная пленка

По результатам эксперимента установлено, что хладагент не течет под действием собственного веса. Это обусловлено наличием капиллярного эффекта, а также тем, что хладагент испаряется в стенках теплообменника и поступает как газ в обратном направлении. Поэтому необходим крионасос или другой способ проталкивания хладагента через теплообменник, либо первоначальное криостатирование всей системы от комнатной температуры до рабочей.

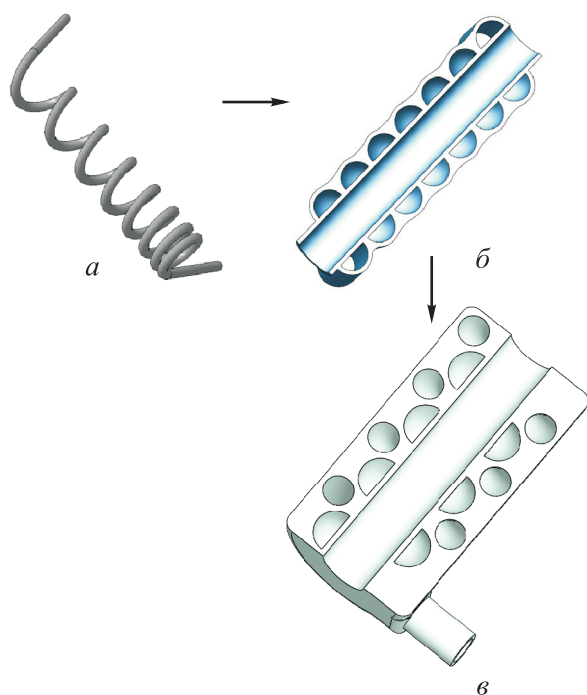


Рис. 3. Схема изменения конфигурации теплообменника:
а — теплообменник-змеевик; б и в — теплообменники с одним и двумя контурами



Рис. 4. Внешний вид образца ДСТ, изготовленного методом SLM-печати

Также эмпирический анализ показал, что исследование конусности ледяной защитной пленки не является приоритетным направлением вследствие незначительности получаемых эффектов и затруднительного экспериментального наблюдения.

Исправление недостатков теплообменника-змеевика (рис. 3, а) заключается в увеличении площади контакта между ним и ФТ. Усложнение геометрической формы теплообменника с закрытыми внутренними полостями требует применения аддитивных технологий (рис. 3, б) [10]. Для более эффективного использования хладагента (за счет увеличения длины его пути) теплообменник дополнен вторым контуром (рис. 3, в).

Внешний вид образца двухконтурного спирального теплообменника (ДСТ), изготовленного методом SLM-печати, показан на рис. 4.

Постановка краевой задачи теплопроводности и тепловой баланс. Направление движения хладагента сложное: сначала по внутренней спирали вниз, затем по наружной спирали вверх (рис. 5).

По агрегатному состоянию ДСТ классифицирован как испарительный, где жидкий хладагент, воспринимая теплоту, испаряется, т. е. переходит в газовую фазу. Так как ДСТ имеет второй (внешний) контур, изолирующий первый, принимаем допущение об отсутствии потерь теплоты во внешнюю среду.

Также для этих целей можно использовать низкотеплопроводные покрытия (например, теплозащитные [11]). В этом случае тепловой баланс сводится к равенству количества теплоты, отбираемой от горячего хладагента, Q_T и количества теплоты, отдаваемой холодному хладагенту, Q_X , т. е. $Q_T = Q_X = Q$.

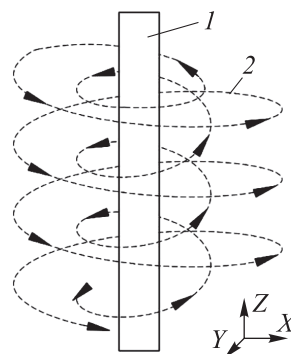


Рис. 5. Схема движения хладагента:
1 — ФТ с поверхностью S; 2 — траектория хладагента

Для теплообменника с газообразным хладагентом справедливо выражение

$$Q = G_x c_{p_x} (T_{x2} - T_{x1}),$$

где G_x и c_{p_x} — массовый расход и удельная теплоемкость при постоянном давлении холодного хладагента; T_{x2} и T_{x1} — температура холодного хладагента на входе в теплообменник и на выходе из него [12].

Для математического описания процесса теплообмена необходимо добавить краевые условия: определить параметры потока в начальный момент времени ($\tau = 0$) и установить граничные условия, т. е. параметры набегающего потока хладагента и условия на обтекаемых им поверхностях.

Уравнение краевой задачи нестационарной теплопроводности в сплошной среде для теплообменника в декартовой системе координат x, y, z имеет вид

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где T — поле температур, $T = T(x, y, z, \tau)$; K_{xx} , K_{yy} и K_{zz} — коэффициент теплопроводности в направлении x , y и z соответственно; Q — мощность теплоисточника внутри ФТ, $Q = Q(x, y, z, \tau)$; ρ и c — плотность и удельная теплоемкость материала теплообменника.

Для частного решения задачи (1) должны быть заданы начальные и граничные условия. Выделим три рода граничных условий.

Граничные условия первого рода — на поверхности ФТ S задана температура

$$T_s = T(x, y, z, \tau), \quad x, y, z \in S. \quad (2)$$

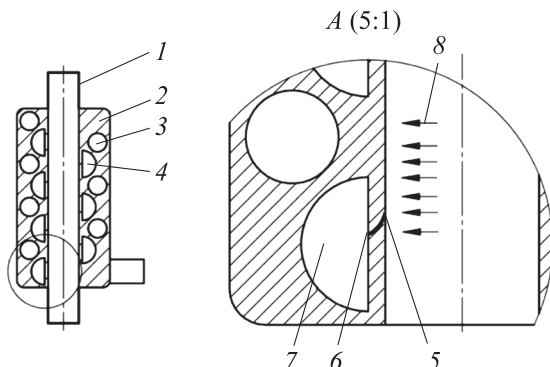


Рис. 6. Схема передачи теплоты и кривая изменения температуры $T_s - T_b$:

1 — ФТ; 2 — корпус ДСТ; 3 и 4 — наружный и внутренний контур; 5 и 6 — точка с температурой T_s и T_b ; 7 — хладагент, движущийся по каналу со скоростью $v = v(x, y, z, \tau)$; 8 — направление движения теплового потока q

Граничные условия второго рода — на поверхности S задан тепловой поток плотностью (см. рис. 5)

$$q = K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z, \quad (3)$$

где l_x , l_y , l_z — направляющие косинусы внешней нормали поверхности S (тепловой поток положителен, так как теплота отводится от ФТ).

Граничные условия третьего рода — на поверхности S происходит конвективный теплообмен (рис. 6), описываемый выражением

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -h(T_s - T_b), \quad (4)$$

где h — коэффициент теплоотдачи; T_s — температура поверхности S ; T_b — температура хладагента.

Плотность теплового потока, отводимого с поверхности ФТ вследствие конвекции,

$$q_h = h(T_s - T_b).$$

Начальные условия — температура ФТ в некоторый начальный момент времени τ_0

$$T_0 = T(x, y, z, \tau_0). \quad (5)$$

Температура ФТ составляет, как правило, 60...70 °С.

Задача (1)–(5) имеет вариационную формулировку: решение уравнения (1) с граничными условиями (4), (5) эквивалентно нахождению в фиксированный момент времени минимума функционала [13]

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \left[K_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + K_{zz} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2 \left(Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) T \right] dV + \int_S q T dS + \int_S \frac{h}{2} (T_s - T_b) dS. \quad (6)$$

Вследствие движения жидкого хладагента происходит не только кондуктивный перенос теплоты, но и конвективный за счет его течения со скоростью v . После подстановки в уравнение (1) проекций скоростей течения хладагента на охлаждаемую ФТ v_x , v_y , v_z запишем

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right),$$

где

$$v_x = v(x, \tau), \quad v_y = v(y, \tau), \quad v_z = v(z, \tau).$$

Для перехода от неподвижного хладагента к движущемуся заменяем частную производную $\partial T/\partial \tau$ на полную $dT/d\tau$ и получаем

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{d\tau} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{dz}{d\tau}$$

или

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z},$$

где

$$v_x = \frac{dx}{d\tau}, v_y = \frac{dy}{d\tau}, v_z = \frac{dz}{d\tau};$$

$\partial T/\partial \tau$ — скорость изменения температуры рассматриваемого элементарного объема хладагента в момент времени τ .

Используя параметр $dT/d\tau$, запишем уравнение переноса теплоты в движущейся среде

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} = & K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \\ & - \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

где

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

— компонент, определяющий скорость изменения температуры теплопроводностью;

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

— скорость изменения температуры, обусловленного переносом объема, т. е. вследствие конвекции.

Протекание процесса конвективного теплообмена зависит от распределения скорости течения хладагента в канале около обтекаемой им ФТ.

Система приведенных дифференциальных уравнений теплоотдачи, переноса теплоты и движения хладагента совместно с уравнением неразрывности полностью описывает все множество процессов конвективного теплообмена. Решение описанной системы уравнений позволит определить значения скоростей течения, температур, коэффициентов теплоотдачи и плотности теплового потока во всей рассматриваемой области [12].

Такие задачи можно решать аналитически или методом компьютерного моделирования.

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет приближенно численно решать широкий спектр физических проблем, формулируемых в виде системы дифференциальных уравнений или в вариационной формулировке. Обоснование МКЭ для тепловых задач обычно выполняют методом Галеркина или минимизацией соответствующего функционала, например, выражения (6) [14, 15].

При моделировании теплообмена между ДСТ и ФТ необходимо учитывать изменение агрегатного состояния хладагента. При контакте с нагревателем жидкий азот испаряется и трансформируется в смешанное парогазовое состояние. Для имитации фазового перехода, а также кипения, воспользуемся специализированной программной средой.

Настройка моделирования теплообмена.

В качестве объекта сравнения использовали теплообменник, выполненный по схеме Мурашова без оребрения (далее ТМ) [16].

Сравнивая ДСТ и ТМ, выясняли, какой способ течения хладагента предпочтительнее: его непосредственный контакт с ФТ или через стенку. Определяли, какая траектория лучше: свободное обтекание ФТ или одномерное движение по спирали.

Исходные 3D-модели для имитации теплообмена приведены на рис. 7.

Моделирование выполняли в следующей последовательности. Строили конечно-элементные модули обоих теплообменников (рис. 8). Для модели ДСТ количество конечных элементов составляло около 500 000, для ТМ — примерно 100 000. Настраивали начальные условия препроцессора. Задавали текущий хладагент как комбинацию из двух фаз — жидкого азота низкого давления и азота-пара низкого давления. Выделяли границы течения хладагента и назначали вход и выход (рис. 9, а и б).

Физические параметры хладагента

для настройки моделирования в специализированной программной среде

Термодинамическое состояние	Реальный газ
Уравнения состояния	Соаве — Редлиха — Квонга
Молярная масса, кг·кмоль ⁻¹	28,014
Критическая температура, К	126,2
Критическое давление, бар	33,98
Критический объем, см ³ /моль	90,1
Ацентрический фактор (мера чистоты вещества)	0,39

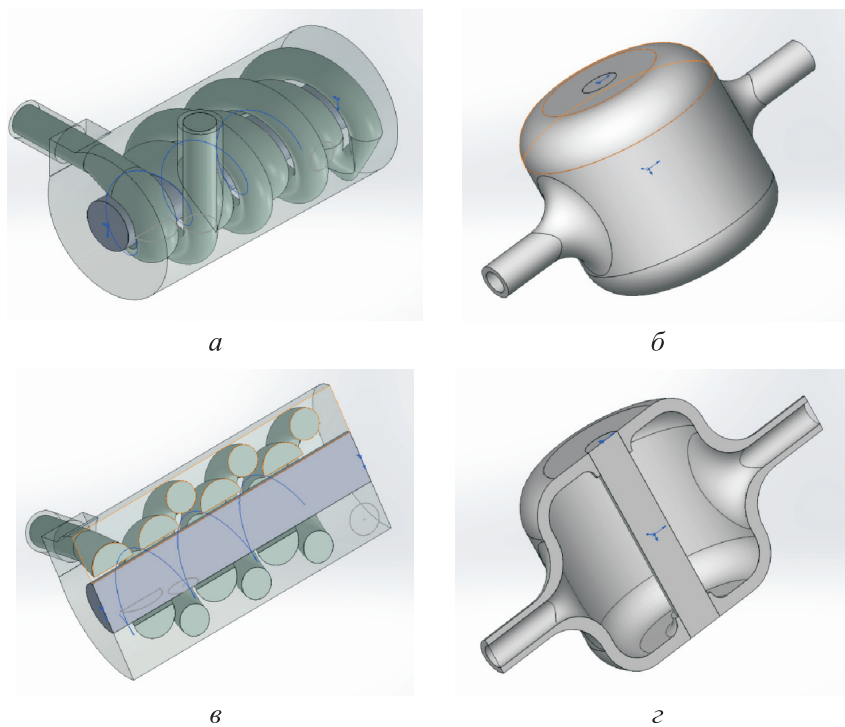


Рис. 7. Исходные 3D-модели для имитации теплообмена в ДСТ (а, в) и ТМ (б, г):
а, б — внешний вид; в, г — в разрезе

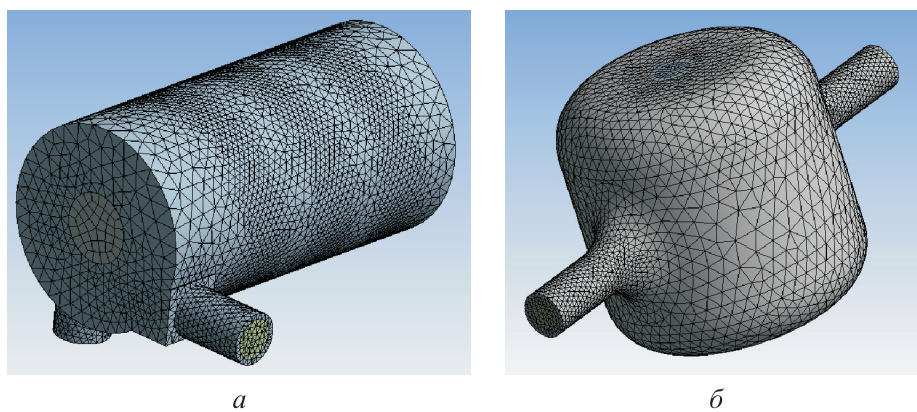


Рис. 8. Конечно-элементные модели ДСТ (а) и ТМ (б)

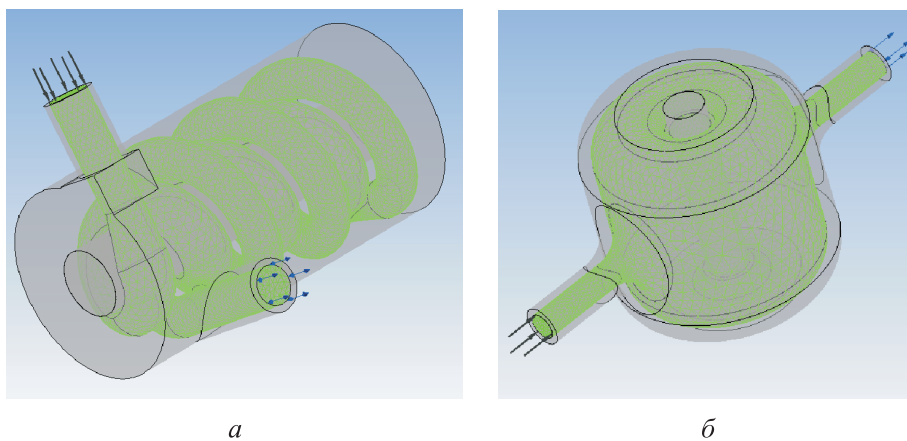


Рис. 9. Модели ДСТ (а) и ТМ (б) с выделенными границами канала и назначенными входом и выходом хладагента

Температура кипения, К	77,35
Коэффициенты полинома четвертой степени для обеспечения фазового перехода:	
a_1	3,539
a_2, K^{-1}	$-0,261 \cdot 10^{-3}$
a_3, K^{-2}	$0,007 \cdot 10^{-5}$
a_4, K^{-3}	$0,157 \cdot 10^{-8}$
a_5, K^{-4}	$-0,099 \cdot 10^{-11}$
Предел температуры для начальной удельной теплоемкости, К:	
нижний	100
верхний	1000
Начальные параметры:	
температура, К	293,15
давление, Па	101 325
Табличное значение температуры, К:	
минимальное	50
максимальное	400
Абсолютное давление, кПа	
минимальное	10
максимальное	150

При движении двухфазного потока абсолютные скорости течения жидкой и паровой фаз различаются: при нисходящем движении хладагента скорость течения первой больше, чем у второй [17]. Для учета этой особенности устанавливали вектор действия поля массовых сил вдоль оси ФТ в направлении движения гидроабразивной ультраструи. Задавали среднюю скорость течения фаз хладагента самотеком в трубе 1 м/с. Принимали модель турбулентности $k-\epsilon$.

Основное допущение этой модели заключалось во вводе динамической вязкости μ (Гипотеза Буссинеска). Эта модель включает в себя две концепции: генерацию P и диссипацию ϵ турбулентности. Физический смысл генерации

турбулентности P состоит в порождении новых вихрей и пульсаций. Диссипация турбулентности ϵ представляет собой рассеивание больших вихрей на малые, приводит к уменьшению турбулентности и усреднению скорости течения потока [18].

Для моделирования выбраны следующие параметры кавитации: давление насыщенного пара 0,1013 МПа; диаметр парогазовых полостей $2 \cdot 10^{-6}$ м. Задан тепловой поток с цилиндрической поверхности ФТ $Q = 416$ Дж/с. [19]. Материалом корпуса теплообменника принят алюминий, материалом ФТ — инструментальная сталь.

В результате моделирования МКЭ сгенерирована картина процесса захлаживания ФТ: поля и диапазоны температур в ДСТ и ТМ (рис. 10, а и б).

По результатам моделирования теплообмена получены следующие температуры:

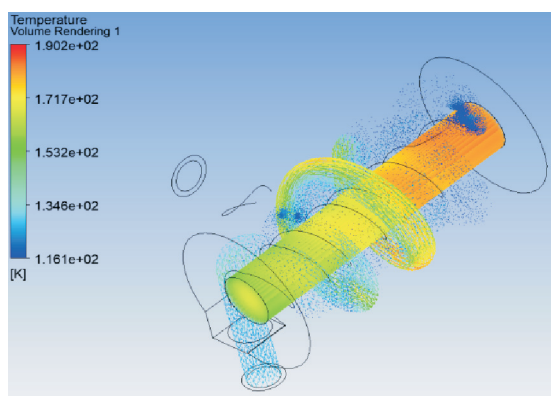
- для ДСТ

$$T = +133...+171 \text{ К } (-140... -102 \text{ } ^\circ\text{C});$$

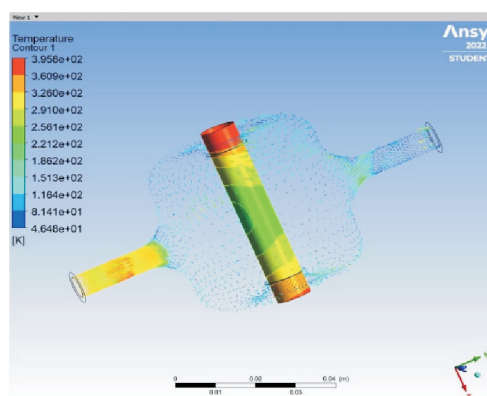
- для ТМ

$$T = +151...+359 \text{ К } (-122...+86 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Обсуждение результатов. Анализ результатов моделирования показал, что отводимой теплообменником энергии достаточно для получения температур, близких к криогенным, т. е. можно считать, что тепловой баланс рассматриваемого способа охлаждения сходится. При необходимости можно увеличить напор/расход хладагента путем увеличения площади сечения канала с целью интенсификации теплообмена.



а



б

Рис. 10. Поля и диапазоны температур в ДСТ (а) и ТМ (б)

Выводы

1. Подтверждена возможность криогенного захлаживания ФТ в ДСТ и ТМ.
2. Показано, что поле температур в ДСТ имеет более равномерный характер, а интервал

распределения температур меньше в 5,5 раз, чем в ТМ. В результате применения ДСТ представляется возможным достижение более низких температур ФТ, а также существенное снижение верхней границы диапазона температур относительно таковой у ТМ.

Литература

- [1] Тарасов В.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 4, с. 46–53, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-4-46-53>
- [2] Jegaraj J.J.R., Babu N.R. A soft computing approach for controlling the quality of cut with abrasive waterjet cutting system experiencing orifice and focusing tube wear. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, vol. 185, no. 1–3, pp. 217–227, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.124>
- [3] 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. 2318, art. 150013, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035803>
- [4] Yuvaraj N., Pradeep Kumar M. Cutting of aluminium alloy with abrasive water jet and cryogenic assisted abrasive water jet: a comparative study of the surface integrity approach. *Wear*, 2016, vol. 362–363, pp. 18–32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.008>
- [5] Изотов Н.А., Галиновский А.Л., Янко М.А. Математическое моделирование криогенного охлаждения струеформирующего соплового элемента установки для гидроабразивной резки. *МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовки в машиностроении. Сб. тр. межд. науч.-тех. конф.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 196–197. EDN NJESGV.
- [6] Золотоносов Я.Д., Вачагина Е.К., Крутова И.А. и др. Современные змеевиковые аппараты, перспективы их развития и теория расчета. *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, 2021, т. 13, № 1, с. 52–65.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Камалов Т.В., Колпаков В.И. Влияние геометрии струеформирующего канала на параметры гидроабразивной обработки. *XLVII Академические чтения по космонавтике*. Т. 3. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, с. 412–413. EDN AHQNDT
- [10] Абашин М.И., Герасимова А.М., Вдовин А.А. Импортозамещающие технологии производства расходных элементов гидроструйного оборудования, применяемого для обработки материалов ракетно-космической техники. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-9-1529>
- [11] Варава В.Н., Кудряков О.В., Грищенко В.И. Аспекты теплозащиты машиностроительного и энергетического оборудования: применение стойких к окислению комбинированных покрытий на основе никеля. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 2023, т. 23, № 2, с. 140–154, doi: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-140-154>
- [12] Котовский В.Н. *Теплопередача*. Москва, МГТУ ГА, 2015. 73 с.
- [13] Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов*. Москва, Мир, 1979. 392 с.
- [14] Бруяк В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. и др. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench*. Ч. 1. Самара, СамГТУ, 2010. 271 с.
- [15] Пронин В.А., Жигновская Д.В., Цветков В.А. *Введение в расчетную платформу Ansys Workbench*. Санкт-Петербург, ИТМО, 2019. 46 с.
- [16] Мурашов И.Д., Петраков С.А. Устройство для гидроабразивной резки. Патент РФ 2393077. Заявл. 25.06.2009, опубл. 27.06.2010.

- [17] Кириченко Ю.А., Козлов С.М., Русанов К.В. и др. *Теплообмен при кипении азота и вопросы охлаждения высокотемпературных сверхпроводников*. Киев, Наукова Думка, 1992. 277 с.
- [18] Коркодинов Я.А. Обзор семейства К-ε моделей для моделирования турбулентности. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2013, т. 15, № 2, с. 5–16.
- [19] Perzel V., Flimel M., Krolczyk J. et al. Measurement of thermal emission during cutting of materials using abrasive water jet. *Thermal Science*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 2197–2203.

References

- [1] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L., Elfimov V.M. Minimization of technological cost price of hydroabrasive cutting taking into account cost and technological parameters of cutting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2011, no. 4, pp. 46–53, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2011-4-46-53> (in Russ.).
- [2] Jegaraj J.J.R., Babu N.R. A soft computing approach for controlling the quality of cut with abrasive waterjet cutting system experiencing orifice and focusing tube wear. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, vol. 185, no. 1–3, pp. 217–227, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.124>
- [3] 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. 2318, art. 150013, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0035803>
- [4] Yuvaraj N., Pradeep Kumar M. Cutting of aluminium alloy with abrasive water jet and cryogenic assisted abrasive water jet: a comparative study of the surface integrity approach. *Wear*, 2016, vol. 362–363, pp. 18–32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.008>
- [5] Izotov N.A., Galinovskiy A.L., Yanko M.A. [Mathematical modelling of cryogenic cooling of a jet-forming nozzle element of a waterjet cutting machine]. *MashTekh 2022. Innovatsionnye tekhnologii, oborudovanie i materialnye zagotovki v mashinostroenii. Sb. tr. mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [MashTech 2022. Innovative Technologies, Equipment and Material Workpieces in Mechanical Engineering. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.] Moscow, Bauman MSTU Publ., 2022, pp. 196–197. EDN NJESGV (in Russ.).
- [6] Zolotonosov Ya.D., Vachagina E.K., Krutova I.A. et al. Modern coil apparatuses, their development prospects and calculation theory. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Energy University], 2021, vol. 13, no. 1, pp. 52–65. (In Russ.).
- [7] 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.).
- [8] Kolpakov V.I., Ilyukhina A.A. *Fiziko-matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya strueformiruyushchego trakta gidroabrazivnoy ustanovki* [Physical and mathematical modelling of functioning of the jet-forming path of a waterjet plant]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021. 36 p. (In Russ.).
- [9] Kamalov T.V., Kolpakov V.I. [Influence of the geometry of the jet-forming channel on the parameters of waterjet treatment]. *XLVII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. T. 3 [XLVII Academic Readings on Cosmonautics. Vol. 3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2023, pp. 412–413. EDN AHQNDT (in Russ.).
- [10] Abashin M.I., Gerasimova A.M., Vdovin A.A. Import-substituting technology of hydra jetting equipment consumable items production used for processing RST materials. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2016, no. 9, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-9-1529> (in Russ.).
- [11] Varavka V.N., Kudryakov O.V., Grishchenko V.I. Aspects of thermal protection of machine-building and power equipment: application of oxidation-resistant combined nickel-based coatings. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 140–154, doi: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-140-154> (in Russ.).
- [12] Kotovskiy V.N. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, MGTU GA Publ., 2015. 73 p. (In Russ.).

- [13] Segerlind L.J. *Applied finite element analysis*. Wiley, 1976. (Russ. ed.: *Primenenie metoda konechnykh elementov*. Moscow, Mir Publ., 1979. 392 p.)
- [14] Bruyak V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A. et al. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench*. Ch. 1 [Engineering analysis in ANSYS Workbench. P. 1]. Samara, SamGTU Publ., 2010. 271 p. (In Russ.).
- [15] Pronin V.A., Zhignovskaya D.V., Tsvetkov V.A. *Vvedenie v raschetnuyu platformu Ansys Workbench* [Introduction to the calculation platform Ansys Workbench]. Sankt-Petersburg, ITMO Publ., 2019. 46 p. (In Russ.).
- [16] Murashov I.D., Petrakov S.A. *Ustroystvo dlya gidroabrazivnoy rezki* [Device for hydroabrasive cutting]. Patent RU 2393077. Appl. 25.06.2009, publ. 27.06.2010. (In Russ.).
- [17] Kirichenko Yu.A., Kozlov S.M., Rusanov K.V. et al. *Teploobmen pri kipenii azota i voprosy okhlazhdeniya vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov* [Heat transfer at nitrogen boiling and cooling issues of high-temperature superconductors]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1992. 277 p. (In Russ.).
- [18] Korkodinov Ya.A. The review of set of k - ϵ models for modeling turbulence. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2013, vol. 15, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.).
- [19] Perzel V., Flimel M., Krolczyk J. et al. Measurement of thermal emission during cutting of materials using abrasive water jet. *Thermal Science*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 2197–2203.

Статья поступила в редакцию 22.06.2024

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

КРУГЛОВ Павел Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kpv17@bmstu.ru).

ЯНКО Мария Алексеевна — аспирант, 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: mary.prokhorova.bmstu@gmail.com).

ИЗОТОВ Никита Анатольевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: niqmaster@yandex.ru).

Information about the authors

GALINOVSKIY Andrey Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Doctor of Science (Pedagogy), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru).

KRUGLOV Pavel Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kpv17@bmstu.ru).

YANKO Mariya Alekseevna — Postgraduate, Assistant, Department of Rocket and Space Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mary.prokhorova.bmstu@gmail.com).

IZOTOV Nikita Anatolievich — Postgraduate, Department of Rocket and Space Engineering Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: niqmaster@yandex.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Круглов П.В., Янко М.А., Изотов Н.А. Численное моделирование сверхнизкотемпературного воздействия на гидроабразивные фокусирующие трубки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 3, с. 47–56.

Please cite this article in English as:

Galinovskiy A.L., Kruglov P.V., Yanko M.A., Izotov N.A. Numerical simulation of the ultra-low-temperature effect on the waterjet focusing tubes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 3, pp. 47–56.