

УДК 621.9

Прогнозирование толщины обледенения струеформирующего канала фокусирующей трубки гидроабразивной установки

Галиновский Андрей Леонидович

galcomputer@mail.ru

Круглов Павел Владимирович

kpv17@bmstu.ru

Изотов Никита Анатольевич^(*)

niqmaster@yandex.ru

Денисов Михаил Алексеевич

mikdenisov@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена актуальная проблема эрозии фокусирующих трубок (ФТ) гидроабразивных установок. Для повышения эрозионной стойкости предложено криогенное охлаждение ФТ с формированием защитной ледяной пленки. Представлена математическая модель равновесия между ростом льда и его абразивным истиранием в струеформирующем канале на основе модифицированного уравнения Стефана. Исследование включает сравнение с моделью Макконена и верификацию методом компьютерного моделирования в Ansys Fluent. Результаты демонстрируют эффективность криозащиты и позволяют прогнозировать толщину ледяного слоя.

Ключевые слова: гидроабразивная ультразвука, фокусирующая трубка, модель Стефана, модель Макконена, модель Финни

Введение. Гидроабразивная резка является одним из ключевых технологических процессов в современных высокотехнологичных отраслях [1, 2]. Однако ее широкому применению препятствует интенсивная эрозия фокусирующей трубки, снижающая качество обработки и производительность. Одним из перспективных методов повышения эрозионной стойкости является криогенное охлаждение [3], приводящее к формированию защитной ледяной пленки на стенках канала. Данная работа посвящена разработке математической модели, описывающей динамическое равновесие между процессами нарастания и абразивного истирания этого ледяного слоя в струеформирующем канале.

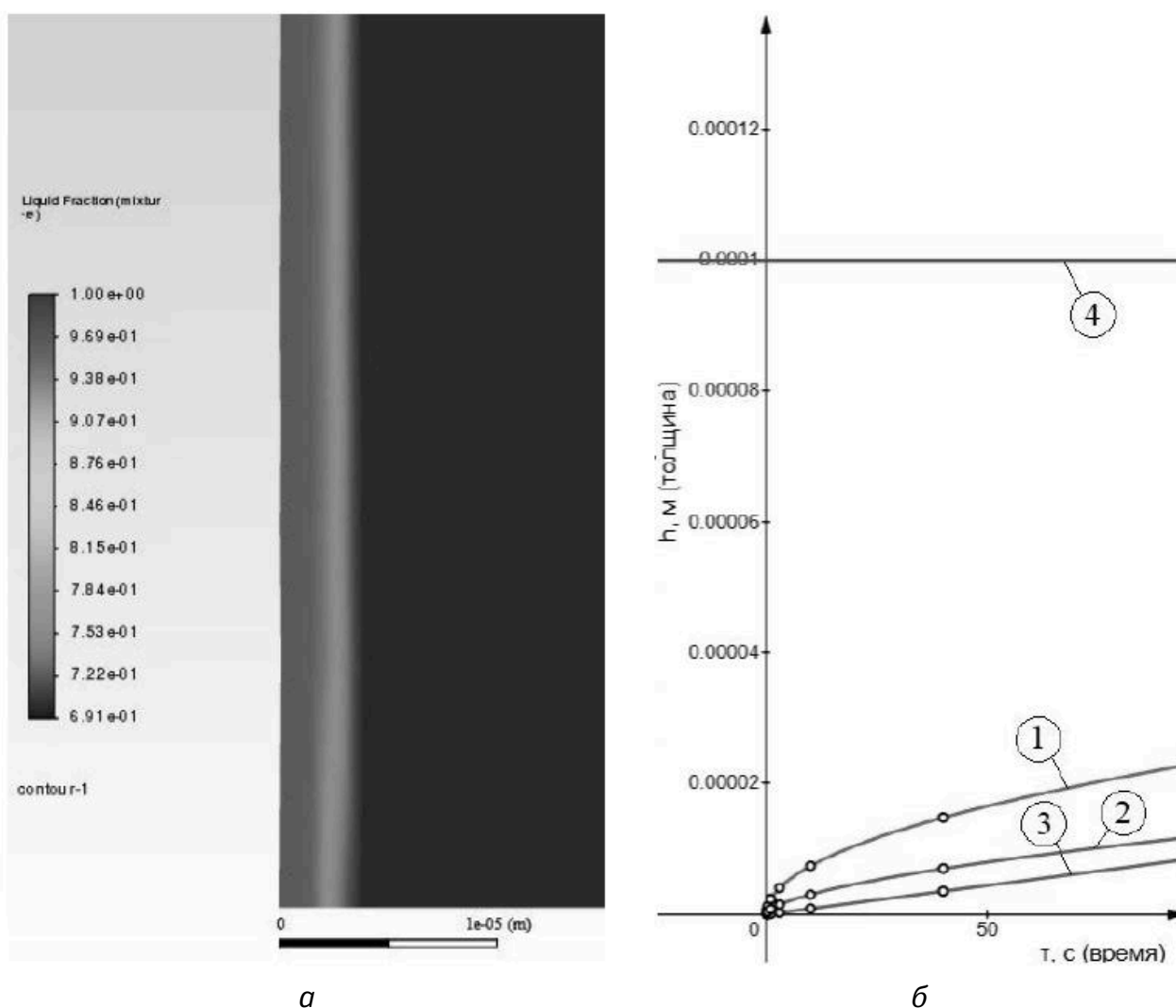
Методы; результаты. Для анализа равновесия между нарастанием льда и его эрозией в струеформирующем канале фокусирующей трубки (ФТ) была разработана теоретическая модель. Рост ледяной пленки описывается модифицированным уравнением Стефана для фазовых переходов, учитывающим теплоперенос через границу раздела фаз и конвекцию [4]. В модель введены поправочные коэффициенты, учитывающие объемную долю жидкой воды в зазоре между ультразвукой и стенкой ФТ, а также поведение капель в турбулентном потоке (число Стокса). Для сравнения использована модель Макконена [5], где скорость обледенения определяется плотностью потока капель с коэффициентами эффективности столкновения, прилипания и аккреции.

Эрозия ледяного слоя моделировалась на основе подхода Финни [6], где скорость разрушения зависит от кинетической энергии абразивных частиц и угла их столкновения с поверхностью. Итоговое дифференциальное урав-

нение системы «нарастание-истирание» получено балансированием скоростей роста и разрушения льда.

Проведено численное моделирование в Ansys Fluent для участка ФТ длиной Δl с учетом движения ультраструи и криоохлаждения (см. рисунок). Обледенение имитировалось как рост твердой фракции с повышенной вязкостью и пористостью.

Результаты расчетов по всем трем моделям показали качественное согласование и подтвердили возможность формирования стабильного ледяного слоя.



Результат моделирования обледенения стенок ФТ (а) и график роста толщины обледенения ФТ (б) по модели 1) Стефана; 2) численного расчета; 3) Макконена; 4) граница ядра ультраструи

Заключение. Разработана теоретическая модель равновесия между нарастанием льда и его абразивным истиранием. Численно и аналитически показана динамика скорости роста ледяного слоя. Сравнительный анализ результатов, полученных по трем независимым методам, показывает удовле-

творительную сходимость, что свидетельствует об адекватности предложенной теоретической модели. Получены оценки динамики нарастания ледяного покрытия на начальном этапе формирования: до $1,5 \times 10^{-5}$ м. в течение первых 40 с. Максимальная толщина ледяного покрытия ограничена границей ядра ультразвука.

Список источников

- [1] 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 (780), с. 47–56.
- [2] Галиновский А.Л., Круглов П.В., Самсонов К.С., Медведь В.С., Изотов Н.А. Экспериментальное исследование температурного воздействия при криогенном охлаждении фокусирующих трубок гидроабразивных установок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, № 4 (160). EDN: ORNKCU
- [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 Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2021, vol. 2318, no. 1. <https://doi.org/10.1063/5.0035803>
- [4] Leppäranta M. A review of analytical models of sea ice growth. *Atmosphere-Ocean*, 1993, vol. 31, no. 1, pp. 123–138.
- [5] Makkonen L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358, no. 1776, pp. 2913–2939.
- [6] Kamarudin N.H., Rao A.K.P., Azhari A. CFD based erosion modelling of abrasive waterjet nozzle using discrete phase method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2016, vol. 114, no. 1, art. no. 012016.