

**Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова**

**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
Сибирского отделения Российской академии наук**

**Санкт-Петербургский государственный университет**

**Национальный исследовательский Томский государственный университет**

**Российская академия наук.  
Санкт-Петербургский научный центр**

**Российская академия ракетных и артиллерийских наук**

**Санкт-Петербургский университет  
Государственной противопожарной службы МЧС России**

**Санкт-Петербургский институт экономики и бизнеса**



**XXVI Всероссийский семинар  
с международным участием  
по струйным, отрывным  
и нестационарным течениям**

**МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ КОНФЕРЕНЦИИ**

**27 июня – 1 июля 2022 года, Санкт-Петербург**

**Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», №85**

---

**Санкт-Петербург  
2022**

применяются многоблочные вычислительные технологии на основе разномасштабных с пересечением структурированных сеток, реализованные в специализированном пакете VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D).

Рассматривается цифровой двойник экспериментальной установки ВиЯ с размещением на стенке канала с размерами  $12 \times 1 \times 4$  остромочной ОТЛ шириной 0,6, длиной 3, глубиной 0,15, при числе Рейнольдса  $Re = 1.67 \times 10^5$ .

Подтверждается физический механизм интенсификации отрывного течения в ОТЛ, обусловленный перепадом статической давления поперек лунки между близкими зонами торможения на наветренной кромке и разрежения в закрученном потоке.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-58-52013, теоретический анализ) и РНФ (грант № 22-19-00056, экспериментальное обоснование).

### Литература

1. Исаев С.А., Баранов П.А., Гортышов Ю.Ф., Леонтьев А.И., Попов И.А., Щелчков А.В., Миронов А.А., Скрыпник А.Н. Теплообменная поверхность. Патент РФ. RU 2716958 С1, МПК F28F 3/04 (2006.01). Заявка 2019124260, 26.07.2019 опубликована 17.03.2020. Бюл. № 8.
2. Isaev S.A., Leont'ev A.I., Baranov P.A. Simulation tornado-like enhancement of heat transfer for low-velocity motion of air in a rectangular channel with cavities. Part 2: Results of parametric studies // Therm. Eng. 2007. Vol. 54. Issue 8. Pз. 655–663.
3. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. Vol. 163 (Part A). Pз. 202–207.
4. Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. Vol. 145. P. 118737.1-13.
5. Isaev S.A., Son E.E., Leontiev A.I., Nikushchenko D.V., Sudakov A.G. Effective heat transfer surfaces of tubes and plates with spiral vortex generators – inclined oval-trench dimples // J. Phys. Conf. Series. 2020. Vol. 1677. Paper No. 012013.
6. Isaev S.A., Guvernuyuk S.V., Mikheev N.I., Popov I.A., Nikushchenko D.V. Numerical and experimental study of abnormal enhancement of separated turbulent flow and heat transfer in inclined oval-trench dimples on the plate and on the narrow channel wall // J. Phys. Conf. Series. 2021. Vol. 2039. Paper No. 012009.
7. Зубин М.А., Зубков А.Ф. Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2022. № 1. С.81-89.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИНЕРТНОГО СУПЕРКАВИТИРУЮЩЕГО ТЕЛА В ВОДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ

**А. Н. Ищенко, А. С. Дьячковский, К. Н. Жильцов, И. М. Тырышкин, А. В. Чупашев**  
*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

Движение тел в воде со скоростями, превышающими сто метров в секунду, возможно достичь только в том случае, если тело движется в водной среде в условиях суперкавитации. В режиме суперкавитирующего движения наблюдается существенное снижение сопротивления за счет образования вокруг тела полости – каверны, заполненной водяным паром [1]. Такой режим позволяет поддерживать необходимую скорость движения и увеличить пройденное телом расстояние.

Процессы суперкавитирующего движения тела активно исследуются как экспериментально, так и с помощью математического моделирования [2]. При этом экспериментальные установки имеют ряд ограничений, из-за которых трудно оценить дальность и изменение траекто-

рии тела в воде. Математическое моделирование позволяет обойти данные ограничения и рассмотреть возникающие в процессе суперкавитирующего движения явления более подробно.

В данной работе представлены результаты математического моделирования входа в воду инертного тела под действием сил давления пороховых газов в затопленной баллистической установке. Для решения задачи нестационарной газодинамики в осесимметричной постановке используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с замыканием системы уравнений стандартной моделью турбулентности  $k-\varepsilon$ , уравнением кавитации Сингхала и уравнениями состояния сжимаемой жидкости и пороховых газов. Граничные условия представляют собой условия прилипания и непротекания на твердых поверхностях баллистической установки и инертного тела, мягкие граничные условия на выходных границах расчетной области. Давление окружающей среды составляло 1 атм. Моделировались нестационарные газо- и гидродинамические процессы взаимодействия струй продуктов сгорания с инертным телом в баллистической установке, вход в воду инертного тела и его движение на участке траектории с образованием каверны.

Методика расчёта основана на применении метода контрольных объёмов. Для практической реализации используется программный комплекс ANSYS Fluent. С помощью блока пользовательских функций UDF (User-Defined Functions) реализован алгоритм расчета на языке C++, позволяющий определить нестационарные газодинамические нагрузки на инертное тело с учетом массо-центровочных характеристик тела.

Решение задачи перемещения тела под действием нагрузок реализовано с привлечением технологий и алгоритмов расчета на основе динамических расчетных сеток. Перестроение расчетных сеток происходит на каждом временном шаге с учетом поступательной скорости, получаемой телом при пересчете газодинамических сил.

В работе представлены результаты математического моделирования суперкавитирующего движения инертного тела в воде. Моделируется процесс движения тела от момента входа тела в воду из канала баллистической установки под действием сил давления продуктов сгорания с образованием каверны и ее эволюции на траектории в суперкаверну.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

#### **Литература**

1. Савченко Ю.Н., Семенов В.Н., Путилин С.И. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел // Прикладная гидромеханика. 1999. Т. 1 (73). № 1. С. 79–97.
2. Ищенко А.Н., Акиншин Р.Н., Афанасьева С.А. и др. Исследование высокоскоростного движения суперкавитирующих тел в воде и их взаимодействие с подводными преградами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 4. С. 8–14.

### **ПОДГОТОВКА КАДРОВ В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНОЙ АЭРОГАЗОДИНАМИКИ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ В РАМКАХ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ «АЭРОДИНАМИКА РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ»**

### **НА КАФЕДРЕ СМЗ «ДИНАМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЁТОМ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ» МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА**

**В. Т. Калугин, В. В. Корянов, А. Ю. Луценко**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Кафедра СМ-3 «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н. Э. Баумана, возглавляемая с 2007 года член-корреспондентом РАН, д.т.н., профессором, дважды Героем Советского Союза Соловьёвым Владимиром Алексеевичем, в настоящее