

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 532.529.6

Б. Я. Бендерский, доктор технических наук, профессор;

К. А. Копылов, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

О ВЫБОРЕ УСЛОВИЙ ВПРЫСКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ СПРЕЙЕРОМ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИН МЕТОДОМ ВТМО

Проведено моделирование процесса взаимодействия теплоносителя с поверхностью прутка пружины. Исследовано влияние параметров впрыска на режимы обтекания прутка теплоносителем. Выявлено, что максимальный контакт теплоносителя с поверхностью обеспечивается через три форсунки, расположенные под углом $\psi = 70^\circ$, при скорости впрыска $v \geq 3,25$ м/с.

Ключевые слова: гидродинамика, обтекание поверхности, прутки, пружина, спрейерная камера, коэффициент обтекания

Введение

В настоящее время развитие машиностроения, энергетической, авиационной, космической и других отраслей промышленности должно быть связано с разработкой и использованием деталей и материалов, повышающих надежность и срок службы изделий, для чего была создана Государственная комплексная программа развития машиностроительного комплекса России [1]. Одним из внедренных направлений данной программы является развитие энергоэффективных технологий, поэтому в различных областях техники сегодня остро встают вопросы интенсификации этапов технологических процессов, анализа энергозатрат, времени процесса. При этом из огромного количества задач, с которыми сталкиваются исследователи, многие связаны с изучением процессов гидродинамики и теплообмена.

В [2] рассмотрено поперечное нестационарное обтекание вязкой жидкостью цилиндрических тел и их теплообмен с потоком. Основное внимание обращается на влияние интенсивности, масштаба турбулентности, формы обтекаемых тел, шероховатости поверхности на гидродинамические характеристики потока, теплообмен. Выявлено, что обтекание цилиндра вязкой жидкостью при $Re = 4 \cdot 10^4$ в зависимости от интенсивности турбулентности может иметь различный характер течения от автоколебательного до стационарного. Отмечается, что с ростом интенсивности турбулентности среднее значение числа Нуссельта Nu увеличивается, что приводит к росту теплоотдачи со стороны набегающего потока. Численный эксперимент показал, что при турбулентном обтекании удлиненных тел с наличием бороздок в виде профиля Жуковского теплоотдача уменьшается.

В работе [3] выполнена визуализация поперечного обтекания кругового цилиндра пульсирующим потоком. Получена структура течения в ближнем следе за цилиндром, предложена карта режимов обтекания и представлено их описание. Результаты

экспериментальных исследований показали, что существуют режимы течения, в которых процесс формирования вихрей за цилиндром подстраивается под частоту пульсаций внешнего потока, выявлены режимы наибольшей интенсификации теплоотдачи по сравнению с обтеканием цилиндра стационарным потоком.

Известны результаты визуальных исследований структуры потока при течении затопленной круглой струи в узком плоскопараллельном канале [4]. На основании анализа фотографий картин течения показано образование характерных вихревых структур, однако для понимания особенностей течения требуется детальное измерение поля скорости во всех обнаруженных областях потока.

Из проведенного анализа следует, что проблема взаимодействия теплоносителя с поверхностью прутка пружины в спрейере требует дальнейшего исследования. В статье рассматривается одна из постановок задачи.

Физическая постановка задачи

Процесс изготовления пружины основан на совмещении операций горячей деформации и нагрева под закалку, в этом случае нагретый прутки подвергается навивке, немедленной закалке и последующему отпуску. Схема данного процесса представлена на рис. 1.

Пруток, нагретый в индукторе токами высокой частоты до температуры порядка 1000°C , навивается на оправку. Далее конструкция поступает в спрейерную камеру, где охлаждается под воздействием теплоносителя (СОЖ) через форсунки. В качестве средства охлаждения можно использовать щелочной раствор, воздух, воду и т. д.

Основной целью технологических процессов машиностроения является получение структуры материала готового изделия за счет обеспечения температурных режимов технологического процесса. Структура материала при ВТМО формируется на этапе

закалки в спрейерной камере, а ее равномерное распределение зависит от контакта теплоносителя с охлаждаемой поверхностью.

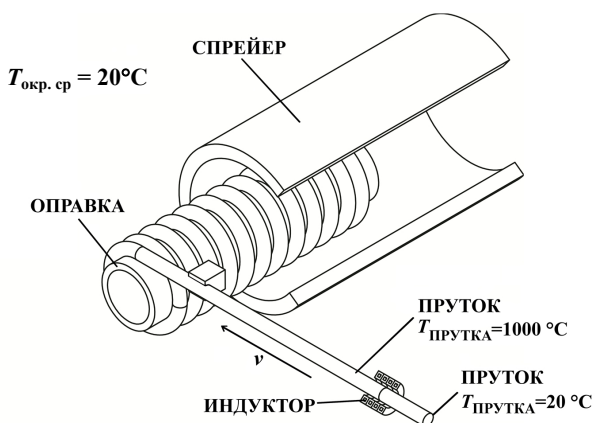


Рис. 1. Схема технологического процесса изготовления пружин методом ВТМО

В работе приведен параметрический анализ влияния геометрии спрейерной камеры и параметров впрыска СОЖ (скорость впрыска, расположение и число форсунок) на гидродинамические параметры потока при взаимодействии водяной струи, подаваемой из форсунки с поверхностью прутка пружины и оправки, расположенных в спрейерной камере.

Ввиду нестационарности и пространственности процесса в постановке задач используется ряд допущений:

1) пространство спрейерной камеры рассматривается как двухфазная двухкомпонентная изотермическая среда (вода – вязкая несжимаемая жидкость, воздух – газ);

2) каждая из сред принята неразрывной;

3) изменение потока жидкости происходит за счет тензора поверхностных сил со стороны газа, сопротивление воздуха не учитывается.

Двумерная задача взаимодействия теплоносителя с прутком

Математическая постановка. При моделировании гидродинамического процесса взаимодействия струи из форсунки с поверхностью прутка решается система уравнений (1)–(4), записанных в общем виде [6]. Уравнение неразрывности для i -й составляющей в дифференциальной форме запишется следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i v_i) = \sum_{j=1}^N J_{ji}, \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i -го компонента смеси; v_i – скорость i -го компонента смеси; J_{ji} – интенсивность перехода массы из j -й в i -ю (или из i -й в j -ю, тогда $J_{ji} < 0$) в единице объема смеси в единицу времени; t – время.

Поскольку в рассматриваемой задаче фазовые переходы отсутствуют, то $J_{ji} = 0$, уравнение неразрывности для смеси в целом примет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность смеси; v – скорость смеси.

Уравнение, выражающее изменение импульса для i -й составляющей в дифференциальной форме, запишется в виде:

$$\frac{\partial \rho_i v_i}{\partial t} + \nabla^k \rho_i v_i u_i^k = \nabla^k \pi_i^k + \rho_i g_i + \sum_{j=1}^N P_{ji}, \quad (3)$$

где π_i^k – тензор поверхностных сил i -го компонента смеси; $\rho_i g_i$ – массовые силы i -го компонента смеси; P_{ji} – интенсивность обмена импульсом между j -й и i -й составляющими. Здесь тензор поверхностных сил и вектор массовых сил, относящиеся к среде в целом:

$$\pi = \sum_{i=1}^N \pi_i, \quad \rho g = \sum_{i=1}^N \rho g_i.$$

С учетом принятых допущений к постановке задачи уравнение изменения импульса для смеси в целом запишется в виде:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \nabla^k \pi^k + \rho g, \quad (4)$$

где π^k – тензор поверхностных сил смеси; g – ускорение свободного падения.

Начальные и граничные условия. Схема расчетной области представлена на рис. 2.

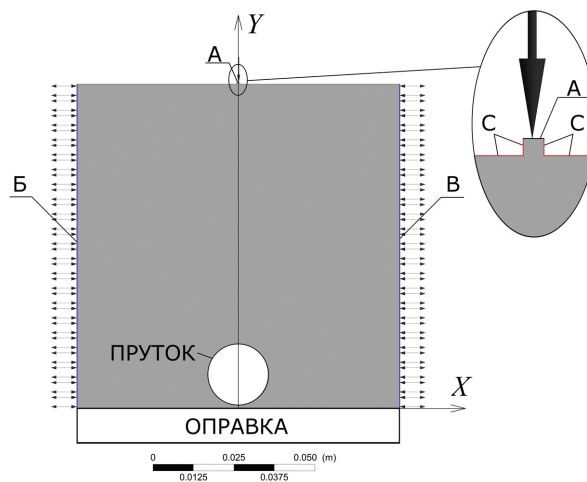


Рис. 2. Схема расчетной области

В начальный момент времени при $\tau = 0$ внутреннее пространство спрейерной камеры заполнено воздухом, при этом объемная доля воздуха $S_{AIR0}(\tau = 0) = 1$, доля воды $S_{WATER0}(\tau = 0) = 0$, давление в спрейерной камере $P_{spec0}^{AIR} = 10^5$ Па.

Нормальная v_n и касательная v_t , составляющие скорости на поверхности прутка, оправки и спрейера (границы «С»), равны нулю:

$$v_n = 0 \text{ м/с}, \quad v_t = 0 \text{ м/с}.$$

На границе «А» задается нормальная составляющая скорости впрыска теплоносителя:

$$v_A|_n = \text{const.}$$

Скорость подачи СОЖ изменяется в интервале от 0,5 до 9 м/с, поскольку $v_A|_n \leq 0,5$ м/с не обеспечивает охлаждение прутка за время нахождения в спрейере ($\tau_{\text{MAX}} = 5$ с) [7].

На левой «Б» и правой границе «В» задаются «мягкие» граничные условия.

На границе раздела сред выполняется условие динамического равновесия:

$$(\tau_1 - \tau_2)e = (p_1 - p_2 + \sigma K)e;$$

$$v_{n1} = v_{n2} = 0;$$

$$v_{t1} = v_{t2},$$

где τ_i – тензор вязких напряжений; e – единичный нормальный вектор; p_i – давление i -го компонента смеси; K – кривизна поверхности взаимодействия фаз; σ – коэффициент поверхностного натяжения [8].

Определено, что в принятом интервале скоростей впрыска теплоносителя число Рейнольдса изменяется с $Re = 0,494E + 3$ до $Re = 0,962E + 4$ (в качестве характерного размера принят диаметр отверстия форсунки $d = 1$ мм), что соответствует ламинарному и переходному режимам течения.

Ввиду симметрии геометрической модели рассматривается участок спрейерной камеры (без учета геометрии оправки), для которого при выполнении расчетов строятся нерегулярные сетки со сгущением узлов в окрестности обтекаемых тел (рис. 3, а). Количество узлов – 175 824, элементов – 129 864 выбрано после проведения тестовых расчетов на различных сеточных моделях с крупными и мелкими элементами. Решение поставленной задачи осуществляется методом конечных объемов.

Обсуждение результатов

Для анализа результатов решения задачи впрыска теплоносителя (рис. 3, б) требуется провести количественную оценку взаимодействия теплоносителя с прутком, для чего вводится безразмерный коэффициент контакта теплоносителя с поверхностью охлаждаемого прутка, который запишется в виде:

$$K_{\text{оп}} = \alpha_{\text{конт}} / 360,$$

где $\alpha_{\text{конт}}$ – угол, отражающий участок контакта теплоносителя с поверхностью прутка, где объемная доля воды $S_{\text{WATER}} \geq 0,9$.

Показано, что при изменении скорости впрыска в интервале $v = 0,5$ –9 м/с угол $\alpha_{\text{конт}}$, характеризующий обтекание поверхности теплоносителем, уменьшается с $129,5^\circ$ до $92,26^\circ$, соответственно, значение $K_{\text{оп}}$ снижается с 0,36 до 0,27.

Результаты расчетов показывают, что невозможно обеспечить полный контакт теплоносителя с охлаждаемой поверхностью при впрыске в спрейерной камере с выбранной геометрией. Вследствие этого была изменена конструктивная схема за счет выполнения выемок в виде дуг окружностей с радиусом R на внутренней поверхности спрейерной камеры (рис. 4).

При моделировании процесса впрыска варьировалось количество форсунок (две и три), угол между форсунками $\psi = 20^\circ$ – 70° и радиус выемки внутренней поверхности спрейерной камеры $R = 55$ мм; 70 мм; 100 мм. Отметим, что при $R = 55$ мм допустимый предел $\psi \leq 70^\circ$, а для $R = 70$ мм и $R = 100$ мм $\psi \leq 60^\circ$.

На рис. 5 представлено изменение давления в сечениях А-А (нижний график рис. 5) и Б-Б (правый график рис. 5). Из результатов расчета следует, что при эжектировании воздуха из области между форсунками «С» (рис. 5) в ней понижается давление, что приводит к сближению струй теплоносителя к оси симметрии и снижению $K_{\text{оп}}$.

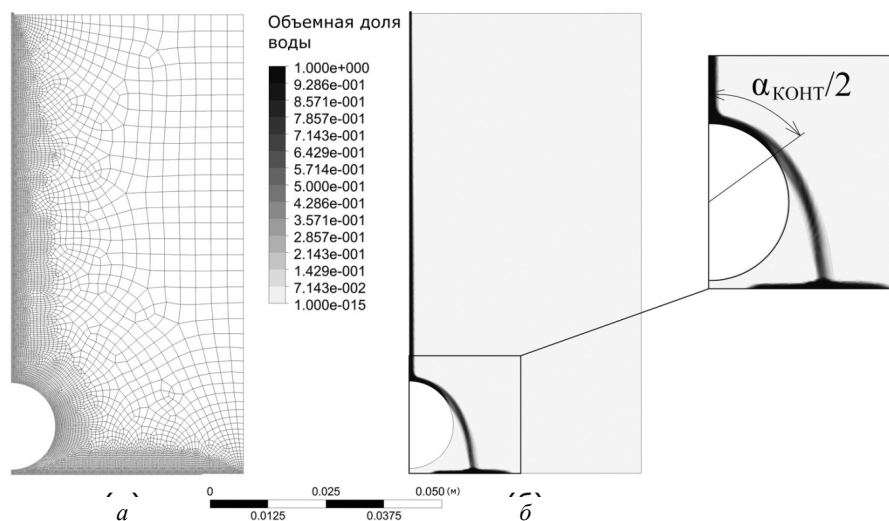


Рис. 3. Сеточная модель (а), распределение объемной доли воды S_{WATER} в расчетной области спрейерной камеры (б)

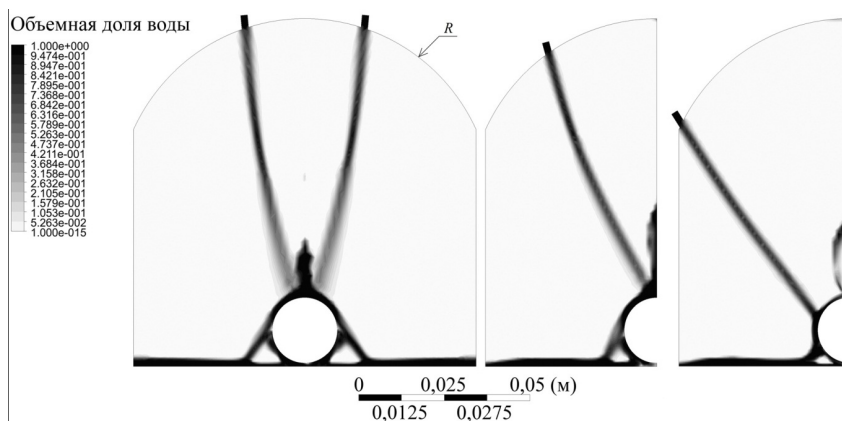


Рис. 4. Объемная доля воды в расчетной области спреерной камеры при впрыске теплоносителя через две форсунки, расположенные под углом $\psi = 20^\circ$ (слева), 40° (по центру), 70° (справа), $R = 55$ мм

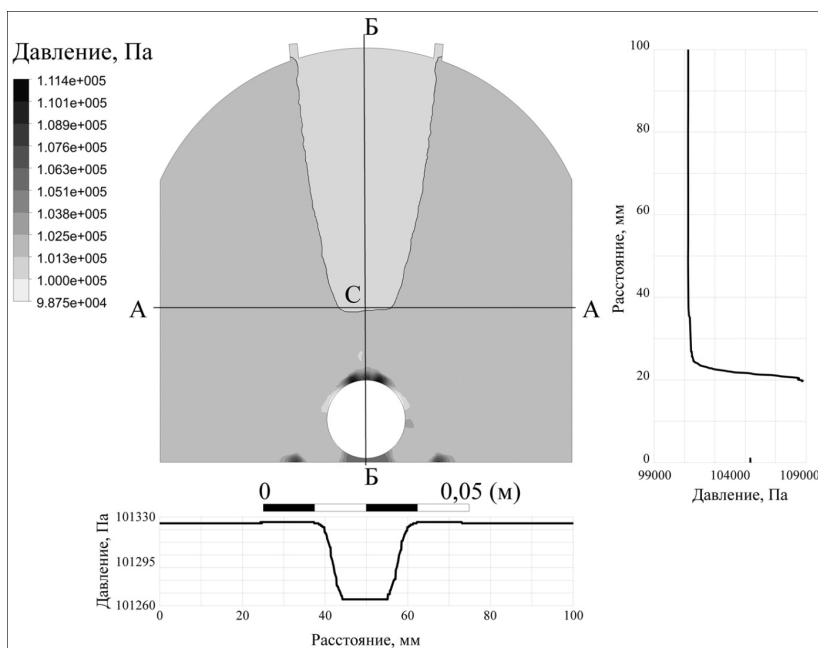


Рис. 5. Распределение давления в расчетной области спреерной камеры при впрыске теплоносителя через две форсунки, расположенные под углом $\psi = 20^\circ$, $R = 55$ мм

Проведенная оценка числа Фруда показывает, что влияние сил тяжести на движение теплоносителя незначительно ($Fr \sim 10^{-5}$). В интервале углов $\psi = 20^\circ - 30^\circ$ отмечено снижение $K_{оп}$, так как увеличивается перепад давления в области «С» $\Delta P = 105$ Па. Дальнейшее увеличение угла $\psi = 30^\circ - 60^\circ$ вызвано уменьшением перепада давления в этой области $\Delta P = 105 - 74$ Па.

Установлено, что максимальная величина коэффициента обтекания, полученная при впрыске теплоносителя через две форсунки ($\psi = 60^\circ$; $R = 100$ мм), составит $K_{оп} = 0,97$, при впрыске через три форсунки $K_{оп} = 1$ ($\psi = 70^\circ$, $R = 55$ мм). В интервале углов $\psi = 20^\circ - 30^\circ$ отмечено снижение $K_{оп}$, как следствие уменьшения перепада давления в области «С» $\Delta P = 96 - 81$ Па.

На рис. 6 представлены результаты влияния скорости впрыска на коэффициент обтекания при различном числе форсунок.

Из рис. 6 следует, что $K_{оп} = 1$ обеспечивается при скорости впрыска теплоносителя $v \geq 3,25$ м/с через три форсунки, $\psi = 70^\circ$, $R = 55$ мм.

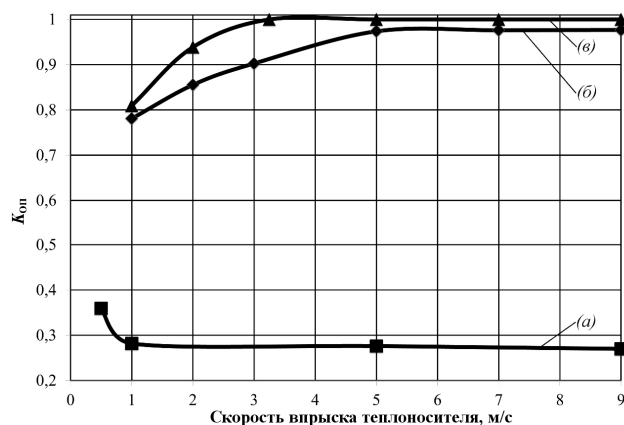


Рис. 6. Зависимость коэффициента обтекания поверхности прутка $K_{оп}$, омываемой теплоносителем от скорости впрыска v через одну форсунку (а); две форсунки (б); три форсунки (в)

Выводы

Разработана методика расчета гидродинамических процессов взаимодействия теплоносителя с прутком в спрейерной камере. Параметрическое исследование влияния конструктивных элементов спрейера на гидродинамику процесса осуществлялось с использованием программного комплекса ANSYS-CFX. На основании анализа результатов сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что при подводе теплоносителя к поверхности прутка через одну форсунку при скорости впрыска в интервале $v = 0,5-9$ м/с величина $K_{\text{оп}} \leq 0,36$. При $v > 1$ м/с коэффициент $K_{\text{оп}} \approx 0,28 = \text{const}$.

2. Максимальная величина коэффициента обтекания поверхности прутка при впрыске теплоносителя через две форсунки $K_{\text{оп}} = 0,97$ ($\psi = 60^\circ$, $R = 100$ мм), через три – $K_{\text{оп}} = 1$ ($\psi = 70^\circ$, $R = 55$ мм).

3. Выявлено, что при подводе теплоносителя через одну форсунку максимальное значение $K_{\text{оп}} = 0,36$ ($v = 0,5$ м/с), две форсунки – $K_{\text{оп}} = 0,98$ ($v = 9$ м/с), три форсунки $K_{\text{оп}} = 1$ ($v = 3,25$ м/с).

Библиографические ссылки

1. Концепция формирования Государственной комплексной программы развития машиностроения России. –

URL: <http://www.soyuzmash.ru/informcenter/concept/concept.htm> (дата обращения: 21.07.2012).

2. Моренко И. В., Федяев В. Л. Влияние турбулентности потока вязкой жидкости на гидродинамические характеристики и теплообмен обтекаемых тел // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 7–8. – С. 36–45.

3. Давлетишин И. А., Михеев Н. И., Молочников В. М. Отрыв пульсирующего потока // Докл. Акад. наук. – 2007. – Т. 417, № 6. – С. 760–763.

4. Перепелица Б. В., Шестаков М. В. Пространственная структура потока при истечении круглой струи в узкий канал // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. – Т. 16, № 1. – С. 57–60.

5. Терехов В. И., Пахомов М. А. Численное исследование гидродинамики и теплопереноса в осесимметричной турбулентной газодисперсной струе // Изв. Рос. акад. наук. Энергетика. – 2009. – № 5. – С. 131–141.

6. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на свойства жаропрочности сплава ХН77ТЮР / В. Д. Садовский, Е. Н. Соколов, С. Н. Петрова и др. // Физика металлов и металловедение. – 1964. – Т. 17, № 6. – С. 845–852.

7. Смирнов М. А., Петрова С. Н., Смирнов Л. В. Высокотемпературная термомеханическая обработка и хрупкость сталей и сплавов. – М.: Наука, 1991. – 167 с.

8. Тонков Л. Е. Численное моделирование динамики капли вязкой жидкости методом функции уровня // Вестн. Удмурт. ун-та. – 2010. – № 3. – С. 134–140.

* * *

B. Ya. Bendersky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

K. A. Kopylov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Choice of conditions for heat carrier injection by spraying at spring production by high-temperature thermo-mechanical treatment

The interaction between the surface of the spring rod and the heat carrier was modeled. The effect of injection parameters on flow modes was investigated. It was revealed that the maximum contact between the surface of the bar and the heat carrier is achieved at the rate of flow over the surface = 1, which is provided by the injection speed $v \geq 3.25$ m/s with three jets, at an angle $\psi = 70^\circ$.

Keywords: hydrodynamics, surface flow, rod, spring, chamber of spray, coefficient of flow

Получено: 21.11.12

УДК 517.958:52/59

Ю. В. Ганзий, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОБАЛЛИСТИКИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ*

Работа посвящена определению аэробаллистических параметров низкоскоростных летательных объектов при помощи математического моделирования.

Ключевые слова: аэродинамика, математическое моделирование, коэффициент лобового сопротивления, аэробаллистические параметры

1. Проблематика исторической реконструкции

Математическое моделирование активно используется для решения широкого круга задач в области технических, естественно-научных и гуманитарных наук. Развитие вычислительной техники, а также

численных методов позволяют разрабатывать математические модели процессов, о котором мы в настоящее время еще не имеем полного представления, и тогда моделирование может выступить как мощное гносеологическое оружие. В данной работе автор