

03

Измерение тепловых потоков на стенке ударной трубы

© Ю.В. Добров, В.А. Лашков

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: youdobrov@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 4 апреля 2022 г.

Принято к публикации 14 мая 2022 г.

Проведено экспериментальное исследование теплового потока при прохождении ударной волны по поверхности ударной трубы с помощью градиентного датчика на основе монокристалла висмута. Полученные данные сравнивались с численным моделированием. Показано, что после прохождения контактной поверхности, разделяющей горячую „пробку“ и толкающий холодный газ, происходит смешение более холодного потока газа с горячим. Проведена оценка теплообмена на контактной поверхности.

Ключевые слова: ударная труба, тепловой поток, нестационарная теплометрия.

DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52923.39-22

Введение

Общеизвестным инструментом для исследования быстро изменяющихся газодинамических процессов является ударная труба. Температура, давление газа, и, конечно, тепловые потоки на стенке ударной трубы носят нестационарный характер. В работе [1], где использовался градиентный датчик теплового потока на основе кристаллического висмута, отмечается, что на боковой и торцевой стенках канала ударной трубы, по-видимому, существуют различные механизмы теплообмена. Эксперимент [2] показал, что на торце канала ударной трубы при отражении ударной волны плотность теплового потока в начальный период, продолжительность которого примерно 1 ms, плавно возрастает до некоторого постоянного уровня. Эти экспериментальные данные противоречат результатам теоретических исследований. Строгий анализ параметров течения газа в пограничном слое, который устанавливается на стенке при прохождении ударной волны, можно найти в работе [3]. Различие экспериментальных данных [1,2] и теоретических представлений [3] потребовало выяснения причины этого несоответствия.

В экспериментальном исследовании [4] изучался нагрев поверхности ударной трубы в зависимости от интенсивности проходящей ударной волны и анализировалось влияние теплообмена на переход от ламинарного к турбулентному режиму течения за ударной волной. Показано, что при увеличении перепада давлений и соответственно скорости прохождения ударной волны возрастает и нагрев поверхности ударной трубы. Также показан переход к турбулентному режиму течения за ударной волной и увеличение интенсивности теплообмена на стенке трубы при смене режима течения, произведена оценка длины ламинарной зоны. В настоящей работе использовались пленочные термосенсоры на ос-

нове коллоидной пасты из платинохлористоводородной кислоты, установленные на стеклянной подложке.

Обзор исследований, посвященных изучению пограничного слоя после прохождения ударной волны и тепловому потоку на стенке, можно найти в [5]. В этой работе для измерения быстроизменяющихся тепловых потоков использовался датчик теплового потока ALTP, который имеет временное разрешение порядка 1 μ s и используется для прямых измерений теплового потока на стенке.

Особый интерес к измерению температуры и тепловых потоков связан с повышением скорости полета и взаимодействием высокоэнтальпийных потоков газа с поверхностью аэродинамического тела. Этим обусловлено появление новых средств и методов измерения тепловых потоков, которые обладают высоким пространственно-временным разрешением. В работе [6] проведены измерения теплового потока при отражении ударной волны от торца ударной трубы и при внешнем обтекании модели сверхзвуковым потоком газа с помощью датчика на анизотропных элементах. Результаты этих измерений сравнивались с показаниями тонкопленочного датчика сопротивления. Сравнение показало корректность и применимость предложенной методики обработки сигнала с датчика на анизотропных элементах. В работе [7] показана возможность использования высокоразрешающей инфракрасной термографии для визуализации нестационарных термических полей при изучении высокоскоростных тепловых потоков от стенок ударной трубы при прохождении ударной волны.

В настоящей работе было выполнено экспериментальное исследование динамики теплового потока на поверхности ударной трубы. Основная цель исследований состояла в получении с помощью градиентного датчика на основе кристаллического висмута дополнительных экспериментальных данных теплового потока на стенке ударной трубы и сравнение их с представленными в

научной литературе, а также получении новых данных по изменению теплового потока при прохождении контактной поверхности. Сделан анализ возможности использования датчика теплового потока для измерения быстроменяющихся тепловых потоков. Проведена серия экспериментов, в ходе которой менялось положение датчика теплового потока по длине ударной трубы. Были получены значения плотности теплового потока при прохождении фронта основной и отраженной ударных волн. Также было выполнено численное моделирование процесса. Полученные экспериментальные данные анализировались с учетом результатов расчетов распределения температуры газа. Показано, в пограничном слое происходит смешение холодного газа, следующего за контактной поверхностью, с горячим, оставленным после прохождения „пробки“, и приведены оценки теплообмена на контактной поверхности.

1. Результаты экспериментального исследования теплового потока на стенке ударной трубы

Для измерения тепловых потоков широкое распространение получили новые типы датчиков, построенные на основе поперечного эффекта Зеебека [8], который определяется генерацией ЭДС в анизотропной среде в направлении, перпендикулярном градиенту температур [9]. Эти датчики привлекают внимание высокой чувствительностью и быстродействием [10]. Градиентные датчики теплового потока (ГДТП) могут работать в широком диапазоне тепловых потоков и температур.

Измерение тепловых потоков проводилось на ударной трубе, изготовленной из алюминиевого сплава Д16 (рис. 1). Рабочим и толкающим газами в экспериментах использовался воздух. Ударная труба состоит из камеры низкого давления 1, из которой с помощью вакуумного насоса откачивался воздух, и камеры высокого давления 2, находящейся под атмосферным давлением. Диаметр трубы 33.5 мм. Длина атмосферной части трубы 0.5 м, длина камеры низкого давления $L_x = 2.11$ м. Диафрагма 3 из полиэтиленовой пленки с тонким металлизированным слоем, отделяющая камеры атмосферного и низкого давления, разрывалась механически с помощью

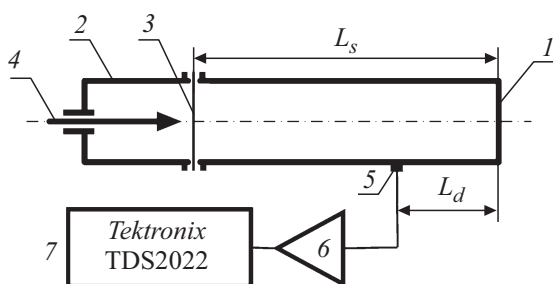


Рис. 1. Схема ударной трубы.

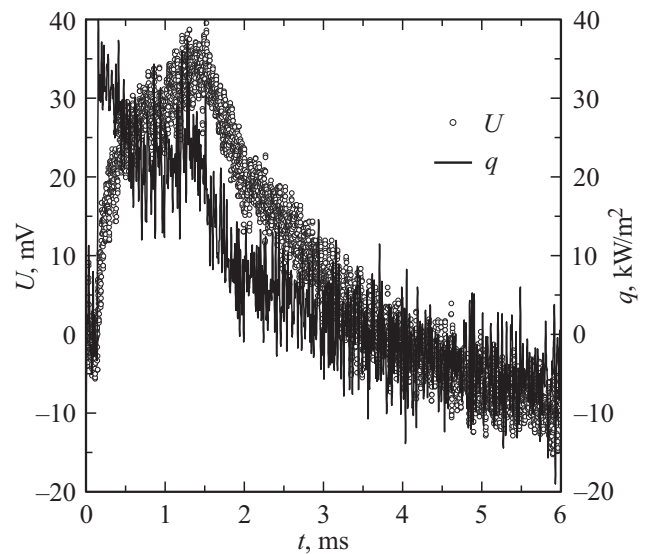


Рис. 2. Измерения теплового потока на расстоянии 1.04 м от торца ударной трубы: U — показания ГДТП, q — плотность теплового потока, t — время.

специального ножа 4, когда давление в камере низкого давления достигало заданного уровня.

При прорыве диафрагмы по трубе низкого давления распространялась ударная волна, скорость движения которой регистрировалась с помощью пьезоэлектрических датчиков давления, установленных на известном расстоянии друг от друга. Импульс напряжения, приходящий с пьезоэлектрического датчика, служил сигналом начала записи сигнала с ГДТП 5. Датчик теплового потока устанавливался на цилиндрической поверхности трубы на разных расстояниях L_d от ее торца, а также на самом торце трубы.

В настоящей работе использовался ГДТП, изготовленный в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, в котором применялись анизотропные монокристаллы висмута высокой чистоты [11]. Датчик обладает малыми размерами и состоит из 10 термоэлементов. Его лицевая поверхность представляет квадрат со стороной 2 мм. Поперечные размеры термоэлемента 0.2×0.2 мм. Коэффициент вольт-ваттной чувствительности ГДТП равен 2.4 мВ/Вт.

Сигнал с ГДТП поступал на усилитель 6 с полосой пропускания до 10 МГц и коэффициентом усиления 175. Результат измерения теплового потока записывался на электронный осциллограф 7 (Tektronix TDS2022). Зарегистрированный сигнал вводился в ЭВМ для дальнейшей обработки по методике [12].

На рис. 2 представлены характерные показания U датчика на стенке ударной трубы при его расположении на расстоянии $L_d = 1.04$ м от торца ударной трубы, а также результат обработки сигнала датчика — плотность теплового потока q .

Отношение давлений на диафрагме в момент ее прорыва 0.05. Число Маха ударной волны $M = 1.76$. На-

чальная температура в камере низкого давления 293 К, давление 5000 Па. Погрешность в определении скорости ударной волны не превышает 3.5%. Наблюдалась хорошая повторяемость результатов измерений. После обработки измеренных данных отмечалось повышение осцилляций в данных теплового потока. Время прохождения ударной волны по датчику составляло порядка $5 \mu\text{s}$, поэтому результаты подвергались сглаживанию, которое производилось по ядру $5 \mu\text{s}$. Конечно, это приводит к снижению временного разрешения исследуемых тепловых потоков.

В момент времени 0.2 ms (рис. 2) на датчик приходит фронт падающей ударной волны, за которым следует горячая „пробка“. Температура газа в „пробке“ выше, чем начальная температура воздуха. На фронте ударной волны ГДТП регистрирует резкое увеличение теплового потока. Затем на датчик приходит контактная поверхность (примерно на 1.5 ms), за которой движется толкающий газ. Отметим, что при прохождении контактной поверхности такого резкого изменения теплового потока не наблюдается.

Оценки, проведенные по теории идеальной ударной трубы, показывают, что температура газа в горячей пробке поднимается на 147 К, а после прохождения контактной поверхности падает на 105 К относительно начальной температуры. Контактная поверхность приходит к датчику через 1.34 ms после фронта ударной волны. Толкающий газ имеет температуру ниже начальной температуры воздуха и температуры стенок трубы, поэтому тепловой поток изменяет свой знак с положительного на отрицательный.

Можно отметить, что фронт плотности теплового потока при прохождении ударной волны после обработки сигнала достаточно резкий. В исходном сигнале датчика такого изменения напряжения не наблюдалось. Движение контактной поверхности по датчику весьма плавно меняет положительный тепловой поток на отрицательный, тепловой поток изменяет свое направление. Причем время, в течение которого падает величина теплового потока, значительно больше $5 \mu\text{s}$. Значение теплового потока переходит через нулевое значение через 2.5 ms после прихода контактной поверхности.

В настоящем исследовании для оценки характера течения в пограничном слое при прохождении ударной волны и определения числа Рейнольдса перехода ламинарного режима течения в турбулентный использовалась методика [5]. Для проведенных экспериментов размерное число Рейнольдса составляло $Re_{\text{mit}} \approx 1.87 \cdot 10^6$ 1/м. Ламинарный режим течения характеризуется постоянством критерия $St\sqrt{Re} = \text{const}$, где St — число Стантона, Re — число Рейнольдса, определенные по параметрам газа после ударной волны.

На рис. 3 показано поведение критерия $St\sqrt{Re}$. Можно отметить область постоянного его значения. На начальной стадии с увеличением числа Рейнольдса критерий растет до некоторого значения, примерно $St\sqrt{Re} \approx 1.3$. Эта величина примерно в 1.5 раза превышает результаты

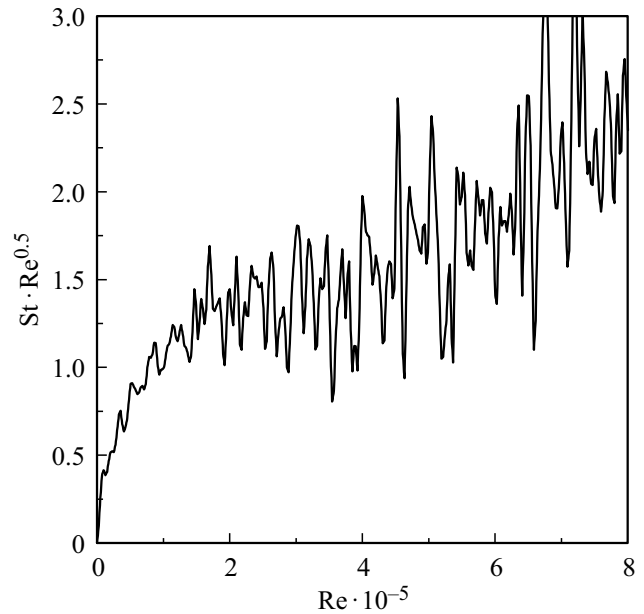


Рис. 3. Зависимость критерия $St\sqrt{Re}$ от числа Рейнольдса Re при прохождении ударной волны на расстоянии 1.04 м от торца трубы.

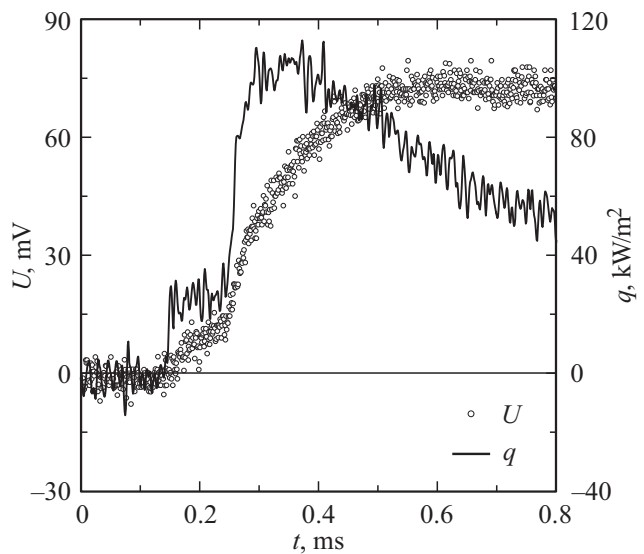


Рис. 4. Результат измерения теплового потока на расстоянии 20 мм от торца трубы: U — показания ГДТП, q — плотность теплового потока, t — время.

исследований, приведенные в работе [4]. Плавный начальный рост критерия, по-видимому, можно объяснить тем, что прохождение ударной волны по ГДТП происходит достаточно длительное время, как указывалось, около $5 \mu\text{s}$. Далее наблюдается плато до чисел Рейнольдса $Re \approx 5 \cdot 10^5$. Затем начинается рост критерия, который, по-видимому, характеризует начало перехода к турбулентному режиму течения в пограничном слое.

На рис. 4 представлены показания датчика U на расстоянии $L_d = 20$ мм от торца трубы, а также результат

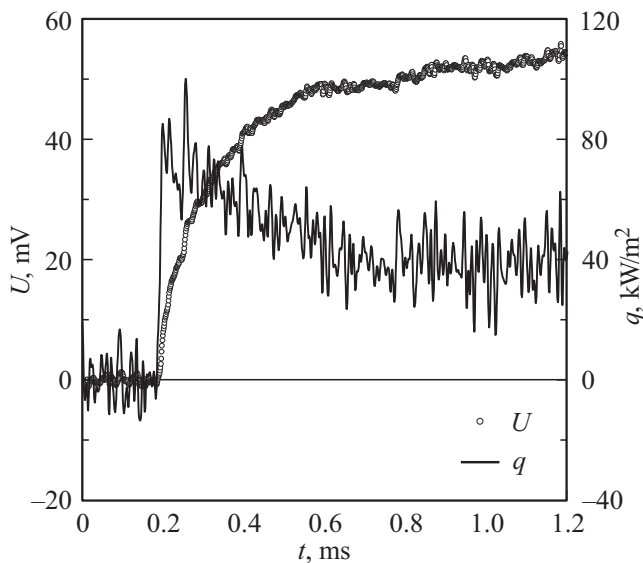


Рис. 5. Измерение теплового потока на торце ударной трубы: U — показания ГДТП, q — плотность теплового потока, t — время.

обработки данных эксперимента (плотность теплового потока q). Условия эксперимента: число Маха 1.75, давление в камере низкого давления 4737 Па. Сначала на датчик приходит падающая ударная волна — первое резкое увеличение теплового потока, происходящее примерно на $150 \mu\text{s}$, (рис. 4). Температура воздуха после ударной волны увеличивается на 147 К, что отражается в увеличении теплового потока.

При прохождении газа за ударной волной тепловой поток слабо меняется и остается практически постоянным. На $250 \mu\text{s}$ на датчик приходит отраженная от глухого торца трубы ударная волна. Она еще больше увеличивает температуру газа (примерно на 312 К), поэтому тепловой поток тоже резко возрастает. Затем отмечается спад теплового потока. Условия теплопередачи изменяются, так как за падающей и отраженной ударными волнами газ имеет разный характер движения. В результате теплопередачи между стенками трубы и нагретого после отраженной ударной волны газом его температура уменьшается, что приводит к падению теплового потока. Оценка критерия для промежутка времени прохождения через датчик падающей ударной волны (в течение примерно $100 \mu\text{s}$) показала, что $St\sqrt{Re}$ имеет постоянную величину, порядка 0.9–1.2.

Были проведены измерения теплового потока на торцевой стенке ударной трубы. Давление в камере низкого давления 5380 Па, число Маха ударной волны 1.74. В этом случае можно считать, что ударная волна приходит одновременно по всей поверхности датчика. Результаты исследования представлены на рис. 5. Исходный сигнал ГДТП аналогичен тому, который наблюдался в работе [2]. Обработка сигнала по методике [12]

удовлетворительно восстанавливает характер изменения плотности теплового потока.

По теории идеальной ударной трубы температура за отраженной ударной волной в этом случае на 312 К выше, чем начальная температура газа. Исследования показали, что после того, как ударная волна отражается от торца трубы, плотность теплового потока резко возрастает, но не остается постоянной, и в последующем монотонно уменьшается, что связано с передачей тепла от горячего газа в стенки ударной трубы. Подобные результаты получены в работе [13] при более высоких числах Маха ударной волны.

Численные исследования теплопередачи вязкого газа после отражения ударной волны от стенки трубы представлены в работе [14]. Рассмотрен случай, когда число Маха падающей волны $M = 2$. Показано, как изменяется температура и тепловой поток на стенке трубы при взаимодействии ее с падающей ударной волной ([14], рис. 3). Отмечается, что процесс формирования отраженной ударной волны во многом обусловлен тепловым режимом стенки.

Если безразмерная тепловая активность ε материала стенки высокая ($\varepsilon \geq 10^3$), где $\varepsilon = \sqrt{c_t \rho_t \lambda_t \frac{\rho_0 T_0^2}{\mu_0 p_0^2}}$, c — теплоемкость, ρ — плотность, λ — коэффициент теплопроводности, μ — вязкость, T — температура, p — давление; индекс t относится к материалу стенки, индекс 0 — к начальным параметрам газа, то временные функции температуры на границе фаз и плотности теплового потока от газа к стенке практически не зависят от величины ε . Показано, что на начальной стадии безразмерная плотность теплового потока $\frac{q_w}{p_0} \sqrt{\frac{\rho_0}{p_0}}$, где q_w — плотность теплового потока в стенку, резко возрастает от 0 до 12.5. Это происходит примерно за безразмерное время $t_r = \frac{t p_0}{\mu_0} = 6$, а затем с увеличением времени монотонно падает. Прохождение пиковых значений теплового потока на уровне 0.5 от максимального продолжается около 5 единиц безразмерного времени.

Для условий представленных экспериментов, когда ударная волна взаимодействует со стенкой из висмута, безразмерная тепловая активность может быть определена величиной $\varepsilon \approx 10^4$, а безразмерная единица времени соответствует физическому реальному времени $3 \cdot 10^{-9}$ с. Измерения плотности теплового потока проводились с частотой 1 МГц, т.е. время между измерениями было на 2 порядка больше характерного времени изменения пиковых значений теплового потока, поэтому всплеск величины плотности теплового потока в проведенных экспериментах не зарегистрирован. Можно отметить, что в работе [4] в экспериментах с использованием АЛТР-датчика, где частота измерений составляла 40 МГц, отмечается всплеск плотности теплового потока при прохождении ударной волны по рабочей поверхности датчика ([5], рис. 8).

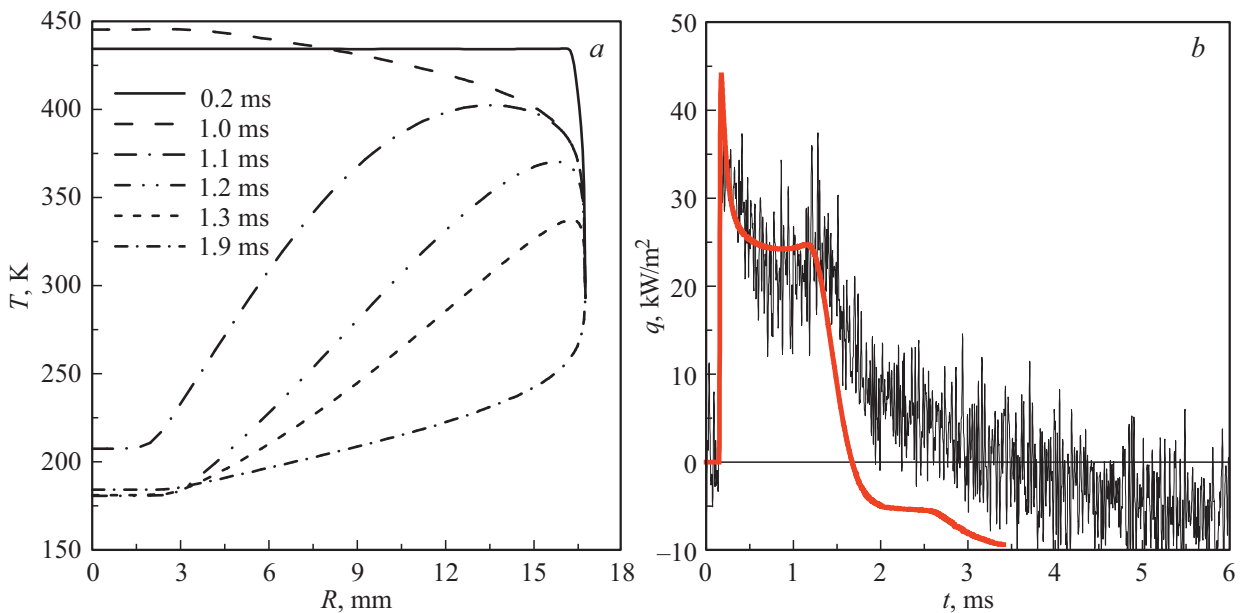


Рис. 6. Результаты численного исследования параметров газа при движении ударной волны на расстоянии 1.04 m от торца трубы. *a* — распределение по радиусу R трубы температуры T газа (время, соответствующее каждому распределению температуры, согласовано с временем, показанном на рис. 6, *b*); *b* — изменение плотности теплового потока q в разные моменты времени t . Красная линия (в онлайн версии) — расчет, черная — экспериментальные данные.

2. Численное моделирование движения газа по ударной трубе

Численное моделирование проводилось в пакете ANSYS Fluent. Рассматривалась осесимметричная задача в рамках модели совершенного вязкого газа, использовалось уравнение состояния Менделеева–Клапейрона, для описания газовой динамики численно решалась система уравнений Навье–Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla(\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\boldsymbol{\tau}}),$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\mathbf{V}(\rho E + p)) = \rho q + \nabla(\lambda \nabla T),$$

где ρ — плотность, \mathbf{V} — вектор скорости, p — давление, $\boldsymbol{\tau}$ — тензор напряжений, E — полная энергия, q — источниковый член энергии, λ — коэффициент теплопроводности, T — температура. Для описания турбулентности применялся Reynolds-Stress Model (RSM), поскольку она описывает движение вязкого газа по простым каналам наиболее близко к имеющимся экспериментальным данным [15], с использованием стандартной пристеночной функции [16].

Задача решалась при следующих начальных условиях: в камере низкого давления — 5000 Pa, в камере высокого давления — 101325 Pa, начальная температура газа — 293 K. По условиям расчетов на границе располагалась стенка с постоянной температурой 293 K, так как при

числах Маха ударной волны, не превышающих 2, изменение температуры поверхности трубы не превышает 5 K [4]. Геометрия расчетной области соответствовала условиям настоящего эксперимента. Расчетная сетка состоит из 412 тысяч ячеек, сетка экспоненциально сгущается к стенке. Минимальный размер ячейки составляет $5 \cdot 10^{-5}$ m, максимальное значение параметра wall $y+$ составляет 7.35.

На рис. 6, *a* представлены результаты численного исследования распределения температуры газа T по радиусу R на расстоянии 1.04 m от торца ударной трубы, где располагался ГДТП. Распределение температуры потока по радиусу трубы для момента времени 0.2 ms соответствует распределению, наблюдающемуся сразу после прихода ударной волны. Распределение, относящееся к 1.0 ms, показывает, что формируется пограничный слой, увеличивается его толщина. Примерно в 1.1 ms на датчик приходит контактный разрыв: в ядре потока температура падает, но у поверхности ударной трубы профиль скорости в пограничном слое остается практически тем же, что и для времени 1.0 ms. С дальнейшим увеличением времени (1.2, 1.3 ms) температура на оси потока уменьшается до температуры толкающего газа, однако температура около стенки трубы остается все еще выше температуры стенки (293 K). Профиль температуры для времени 1.9 ms показывает, распределение температуры около стенки трубы кардинально меняется: температура газа в пограничном слое становится меньше температуры стенки: происходит изменение направления теплового потока.

На рис. 6, *b* приведены результаты расчета плотности теплового потока на расстоянии 1.04 м от торца ударной трубы (красная линия (в онлайн версии)), которые показывают, что при прохождении ударной волны происходит резкий подъем плотности теплового потока, затем величина плотности теплового потока выходит на некоторый практически постоянный уровень. При прохождении контактной поверхности плотность теплового потока падает, но скорость падения отличается от скорости, которую можно наблюдать при прохождении ударной трубы. Падение величины q происходит примерно за время 0.2 ms, причем тепловой поток изменяет свое направление на противоположное. На том же рис. 6, *b* представлены результаты экспериментального исследования плотности теплового потока (черная линия). Видно, что результаты опыта и данные расчета удовлетворительно совпадают, однако в эксперименте отмечается более медленное падение плотности теплового потока после прохождения контактной поверхности. Это обстоятельство требует проведения дополнительных исследований.

Прохождение контактной поверхности не приводит к резкой смене температуры на оси потока, что, по-видимому, связано с тем, что горячая „пробка“ и холодный толкающий газ соприкасаются в течение длительного времени и поэтому обмениваются тепловой энергией. Теплопроводность реального газа приводит к тому, что резкое изменение температуры на контактной поверхности „размывается“.

На контактной поверхности проходит граница, по обе стороны от которой газ (в нашем случае воздух) имеет разную температуру. Эти две области газа, горячая „пробка“ и толкающий холодный газ, находятся в тепловом контакте, значит, между ними должен происходить теплообмен. Можно оценить изменение температуры приграничных слоев газа за время, пока контактная поверхность доходит до места расположения датчика теплового потока.

Датчик расположен на расстоянии 1 м от диафрагмы трубы. Скорость потока за ударной волной в нашем случае $V = 340$ м/с. Значит, время, в течение которого происходит теплообмен, составляет около 3 ms.

Предположим, что теплообмен на оси трубы происходит по модели полуограниченного тела. Решение для этой задачи с учетом того, что по обе стороны контактной поверхности находится воздух, имеет следующий вид [17]:

$$\theta(x, t) = 0.5 \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \right),$$

где a — коэффициент температуропроводности воздуха.

Нетрудно определить, что толщина слоя газа на контактной поверхности, в котором температура отличается от температуры газа в горячей пробке и толкающем холодном газе более чем на 1%, составляет около 10 mm. Время прохождения этого слоя газа по датчику теплового потока — 30 μ s. Это время намного

меньше того, что наблюдается в численных расчетах. По рис. 6, *a* можно оценить время изменения температуры при прохождении контактной поверхности на оси как 0.2 ms, что на порядок больше времени 30 μ s. Очевидно, это связано с тем, что на процесс теплопередачи между газами оказывает влияние не только теплопроводность среды, но и конвективная передача тепла. Причем конвективная теплопередача зависит от „качества“ формирования ударной волны и контактной поверхности при разрыве диафрагмы. Возникновение крупных вихрей при разрыве диафрагмы усиливает перемешивание горячего и холодного газов на контактной поверхности.

Температура газа в пристеночном слое изменяется медленнее, чем в ядре потока. Этот процесс происходит примерно за 0.8 ms. При прохождении горячей „пробки“ на стенке трубы формируется пограничный слой. Слои газа, расположенные у поверхности трубы, имеют скорость течения, близкую к нулю. Когда приходит холодный толкающий газ, на горячие медленные слои накладываются холодные. Требуется время, чтобы холодные и горячие слои газа смешались и обменялись энергией. Это приводит к изменению распределения температуры в пограничном слое, и как следствие, к изменению теплового потока на стенке трубы как по величине, так и по направлению.

3. Выводы

Проведено экспериментальное исследование динамики теплового потока на стенке ударной трубы с помощью ГДТП на основе монокристалла висмута. Опыты показали, что использованный ГДТП удовлетворительно показывает изменения теплового потока на стенке ударной трубы и может применяться для исследования быстротекущих тепловых процессов. Важно при этом учитывать скоростные характеристики датчика. После использования специальной обработки сигнала ГДТП мы видим резкое увеличение значения плотности теплового потока при прохождении фронта ударной волны.

На основе экспериментального и численного исследования течения газа в ударной трубе показано, что при прохождении контактной поверхности изменение теплового потока происходит достаточно плавно, что связано со смешением газа горячей пробки и толкающего газа: в пограничном слое на поверхности трубы холодный толкающий газ смешивается с горячим медленно движущимся слоем, оставшимся после прохождения пробки. На контактной поверхности в ядре потока также происходит обмен тепловой энергией между горячим и холодным газами. Численные расчеты также подтвердили, что при прохождении контактной поверхности плотность теплового потока на стенке трубы не претерпевает скачкообразных изменений.

Благодарности

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ „Вычислительный центр“.

Финансирование работы

Благодарим Санкт-Петербургский государственный университет за финансовую поддержку в рамках проекта Мероприятие 1 (id 84912260).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, Р.Л. Петров, В.В. Григорьев, С.В. Бобашев, Н.П. Менде, В.А. Сахаров. Письма в ЖТФ, **30** (2), 76 (2004).
- [2] С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.В. Бобашев, Н.П. Менде, В.А. Сахаров. Современная наука, **2** (7), 172 (2011).
- [3] H. Mirels. *Boundary Layer Research* (Springer, Berlin, Heidelberg, 1957), p. 283–293.
DOI: 10.1007/978-3-642-45885-9_22
- [4] Ю.А. Поляков, Ю.В. Макаров. Технологии техносферной безопасности, **4** (62), 1 (2015).
- [5] H. Knauss, T. Roediger, D.A. Bountin, B.V. Smorodsky, A.A. Maslov, J. Srulijes. *J. Spacecraft and Rockets*, **46** (2), 255 (2009).
- [6] П.А. Попов, В.А. Сахаров, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, Н.А. Монахов. Физико-химическая кинетика в газовой динамике, **22** (3), 31 (2021). DOI: 10.33257/PhChGD.22.3.939
- [7] I.A. Znamenskaya, A.M. Shagiyanova, E.Yu. Koroteeva, M.I. Muratov, P.A. Ryazanov. *Scientific Visualization*, **12** (5), 13 (2020). DOI: 10.26583/sv.12.5.02
- [8] А.М. Харитонов. *Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч. 2. Методы и средства аэрофизических измерений* (НГТУ, 2007)
- [9] А.Г. Самойлович. *Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии* (Изд-во ЛКИ, М., 2007), 224 с.
- [10] С.В. Бобашев, Ю.П. Головачев, Н.П. Менде, П.А. Попов, Б.И. Резников, В.А. Сахаров, А.А. Шмидт, А.С. Чернышев, С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. *ЖТФ*, **78** (12), 103 (2008). [S.V. Bobashev, Yu.P. Golovachov, N.P. Mende, P.A. Popov, B.I. Reznikov, V.A. Sakharov, A.A. Schmidt, A.S. Chernyshev, S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov. *Tech. Phys.* **53** (12), 1634 (2008). <https://doi.org/10.1134/S1063784208120189>]
- [11] С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. *Градиентные датчики теплового потока* (СПбГПУ, СПб., 2003), 168 с.
- [12] Ю.В. Добров, В.А. Лашков, И.Ч. Машек, А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, Р.С. Хоронжук. *ЖТФ*, **91** (2), 240 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2022.09.52923.39-22
- [13] P.A. Popov, V.A. Sakharov, S.A. Poniaev, N.A. Monakhov, M.A. Kotov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1697** (012225), 1 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012225
- [14] П.П. Андреев, Ю.М. Циркунов. *ИФЖ*, **51** (2), 217 (1986).
- [15] А. С. Лубина, А. А. Седов. *Верификация CFD-моделей ANSYS FLUENT для однофазных течений в каналах простой формы*. 10-я Международная научно-техническая конференция „Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР“ (ОКБ „ГИДРОПРЕСС“, Подольск, Россия, 16–19 мая 2017)
- [16] V.E. Launder, D.B. Spalding. *Computer Methods in Appl. Mechan. Engineer.*, **3**, 269 (1974).
DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
- [17] А.В. Лыков. *Теория теплопроводности* (Высшая школа, М., 1967), 600 с.