

## Моделирование интенсивного теплосилового воздействия газовой среды для испытаний образцов в широком диапазоне параметров

© С.В. Мосолов, И.С. Партола, А.С. Кудинов, И.И. Юрченко,  
А.Г. Клименко, С.А. Федоров

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия

*Результаты работы расширяют доступный диапазон параметров воздействующей газовой среды при испытаниях образцов материалов и покрытий в условиях интенсивных теплосиловых нагрузок для исследования свойств и ресурсных характеристик этих объектов при стационарном и импульсном воздействии. В отличие от большинства распространенных методов особенности предлагаемых в работе условий для испытаний образцов заключаются в одновременном воспроизведении высокого теплового потока и давления высоконапорного потока на поверхности образца, в возможности получения окислительной или восстановительной среды с различным химическим составом, а также в импульсном циклическом воздействии на образец материала. Высокая производительность экспериментальной установки позволяет проводить до 10 испытаний в день.*

*Для проведения исследований образцов моделируется сверхзвуковая газовая струя со степенью нерасчетности, близкой к единице. Газовая струя создается газодинамической установкой при реакции углеводородного горючего и кислорода в камере с последующим ускорением в сопле Лавала. Образец материала крепится на координатном устройстве, позволяющем устанавливать его в требуемом положении относительно оси струи. При необходимости образец может быть оснащен средствами измерения температуры, теплового потока и давления.*

*В целях обеспечения тарированного воздействия на образцы были исследованы поля параметров струи с помощью тарировочных пластин, оснащенных датчиками давления на поверхности и термопарами для определения тепловых потоков. В результате получены поля параметров давлений, тепловых потоков, градиентов давления и напряжений трения на поверхности образцов в зависимости от их ориентации и термодинамических свойств газовой струи, в соответствии с которыми могут проводиться испытания при исследовании свойств материалов. Объектами испытаний могут быть образцы из металлов и композитных материалов, образцы для испытания стойкости покрытий, многослойные конструкции и защитные тканевые материалы.*

**Ключевые слова:** газодинамическая установка, теплосиловое воздействие, образцы материалов, испытания образцов

**Введение.** Для испытаний образцов материалов при интенсивном теплосиловом воздействии газовой среды необходимо одновременно воспроизводить тепловые потоки и давление, а также напряжение трения и градиент давления по поверхности. В зависимости от условий эксплуатации материала может быть востребован не только стационарный, но и импульсный циклический режим воздействия газового потока на образец. Представляет также интерес возможность

формирования при испытаниях окислительной или восстановительной рабочей среды. В настоящее время параметры такого комплексного воздействия ограничены возможностями экспериментальных стендов.

Для испытаний образцов материалов наиболее распространены установки радиационного нагрева, высокочастотные плазмотроны, электродуговые газодинамические установки и аэродинамические трубы (АДТ) с высокочастотными подогревателями. Эти установки широко применяют для исследования различных материалов, но имеют ряд ограничений при моделировании интенсивного теплосилового и импульсного воздействия газовой среды. В частности, на установках радиационного нагрева образец нагревается излучателем, находясь в вакуумной камере или в относительно холодном газовом потоке. Плазмотроны и АДТ создают высокоэнтальпийный поток разреженного газа, который зачастую недостаточен для исследования силового воздействия высоконапорного газового потока. В ряде работ для исследований применяются электродуговые установки, формирующие низкотемпературную воздушную плазму. Импульсное воздействие на установках данного класса труднореализуемо. В связи с этим возникает необходимость использования нестандартных подходов к исследованию материалов в условиях высоких теплосиловых нагрузок, к которым можно отнести использование струй жидкостных двигательных установок и сходных с ними по принципу формирования газового потока установок газогенерации, представляемых в данной работе.

**Современные подходы к получению газовых потоков для исследования образцов материалов.** В работах [1, 2] для исследования абляционных свойств углерод-углеродных композитных материалов в качестве источника высокоэнтальпийного и высоконапорного окислительного газового потока была использована истекающая в затопленное пространство струя продуктов сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) на газообразных водороде и кислороде. Исследуемая модель помещалась на минимально возможном удалении от среза сопла в области устойчивого режима течения продуктов сгорания. В работе [1] отмечается, что начальный нестационарный участок пуска ЖРД препятствует корректному анализу экспериментальных данных; рекомендуется на этом этапе использовать защитные устройства образца в виде вспомогательных крышек из легко уносимого материала типа фторопласта.

Исследования уноса массы углеродных материалов [1, 3, 4] также проводятся на электродуговых установках (ЭДУ), создающих низкотемпературную воздушную плазму с температурой торможения 5000...9000 К и давлением на образце после прямого скачка уплотнения до 0,3 МПа.

Ряд исследований материалов в высокотемпературных сверхзвуковых запыленных потоках посвящен изучению критериев перехода от эрозии исследуемого материала к напылению частиц из воздействующего потока. В работе [5] для проведения таких исследований формировалась сверхзвуковая струя с подмешиванием в форкамеру частиц оксида алюминия размером 50 мкм, температуру торможения варьировали в диапазоне 900...3200 К, число Маха на срезе сопла и в области взаимодействия с образцом недорасширенной струи составляло 2,3 и 4,3 соответственно; исследовали образцы размером 40 и 80 мм из стали и стеклопластика в виде плоского торца. Отмечается, что все испытания проводились в пределах первой «бочки» струи.

Высокочастотные индукционные плазматроны используют при проведении различных исследований материалов — от определения физических свойств углеродной абляционной тепловой защиты [6] и пористых многослойных углеродно-керамических композитных материалов [7] до испытаний стойкости материалов в реакторах [8]. Плазматроны формируют высокоэнтальпийный поток, воспроизводя высокие тепловые потоки в критической точке; при этом силовое воздействие ограничено низким массовым расходом рабочего газа, что в ряде задач не позволяет моделировать газомеханическую составляющую воздействия на образец.

Отдельный класс исследований материалов связан с изучением механических свойств точечно закрепленных в механизме нагрузки образцов, нагреваемых в печи индукционного или резистивного нагрева до высоких температур в вакууме или газовой среде. При использовании методов этого класса температура образцов в вакууме или инертном газе достигала 3000 °С. В работе [9] проводились исследования образцов, нагретых до 1800 °С в окислительной среде, для попытки учета окислительного влияния высокотемпературного потока в реальных условиях. Существенным ограничением применения таких установок является отсутствие скоростного напора газовой среды, которая должна воздействовать на образец. В рассмотренных работах не определены критерии подобия при замене силовой нагрузки от движущейся среды усилием растяжения или сжатия закрепленного в механизме нагрузки образца.

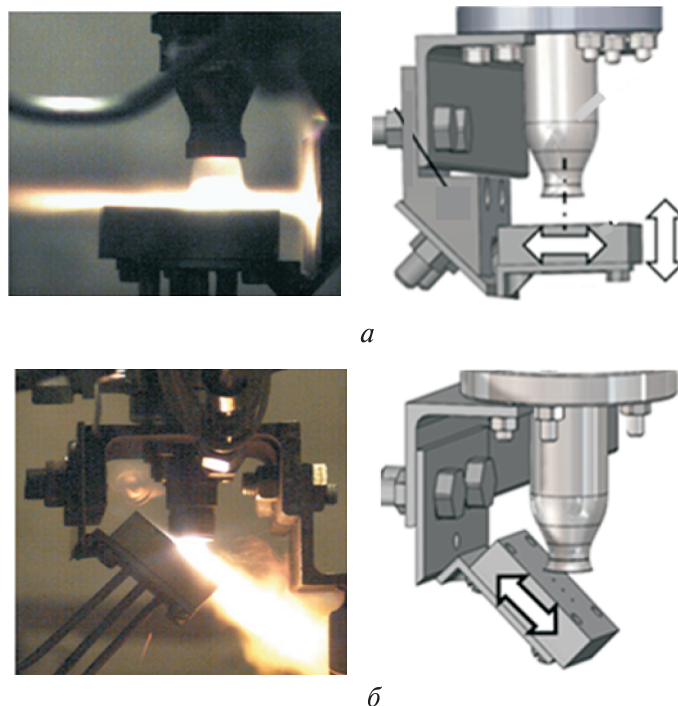
С развитием аддитивных технологий 3D-печати конструктивных элементов возникает необходимость исследования поведения таких материалов при интенсивном теплосиловом воздействии газовой среды. Экспериментальное моделирование проводится при воздействии как чистого газового потока, так и потока с примесями частиц для изучения эрозии аддитивного материала [10, 11]. В работе [10] представлены результаты исследования эрозии на образце из Инконеля 718 размером 25 × 25 × 5 мм в горячей воздушной струе, истекающей из сопла диаметром 1,5 мм при температуре 800 °С и содер-

жащей примеси алюминиевых частиц размером 50 мкм, подаваемых с расходом 4 г/с под различными углами атаки к образцу. В рассмотренных работах не отражаются вопросы газодинамического воздействия на образцы из аддитивных материалов и критерии совмещения газомеханического, эрозионного и газохимического воздействия на образец.

**Формирование газодинамического потока и тарировка рабочего поля струи.** В данной работе для исследований образцов предлагается применять высокоэнтальпийную и высоконапорную струю, создающую высокий тепловой поток при давлении, на один-два порядка превышающем давление, которое достижимо при испытаниях на плазмотронах. Газовая струя формируется в камере со сверхзвуковым газодинамическим насадком в форме сопла Лавалья, обеспечивающем близкое к расчетному сверхзвуковое истечение в условиях окружающего нормального атмосферного давления. В камере осуществляются поджиг и устойчивое горение смеси выбранного углеводорода и кислорода, соотношение массовых расходов которых обеспечивает требуемую температуру и скоростной напор струи. Параметры воздействующей на образец материала газовой струи могут изменяться в широком диапазоне посредством настроек соотношения массовых расходов реагирующих в камере веществ, а также изменением угла наклона образца относительно струи и координаты вдоль оси струи. На рис. 1 показан общий вид экспериментальной установки для получения сверхзвуковой струи и тестовый образец со средствами измерения, установленный под углом  $90^\circ$  (рис. 1, а) и  $45^\circ$  (рис. 1, б), на который действует газовая струя.

Основная сложность исследований образцов в высокотемпературных газовых струях обусловлена необходимостью предварительно измерять давление и тепловой поток на исследуемой поверхности — параметры, определяющие теплосиловую нагрузку на образце в местах его установки относительно среза сопла и оси струи. Для тарировки всего поля струи по этим основным параметрам требуется провести специальные испытания на тарировочных моделях, оснащенных датчиками давления и теплового потока. Поскольку давление и тепловой поток на образце зависят от его формы, тарировочная модель, оснащенная датчиками, повторяет внешнюю форму образца. Например, при исследованиях [3] на предварительном этапе была создана тарировочная модель затупленного цилиндра с датчиками статического давления, давления торможения и теплового потока.

В рассматриваемой работе для исследования полей газодинамических параметров полученной струи использовали тарировочную модель в виде плоской пластины, устанавливаемой в потоке под различными углами и на разном расстоянии от среза сопла.



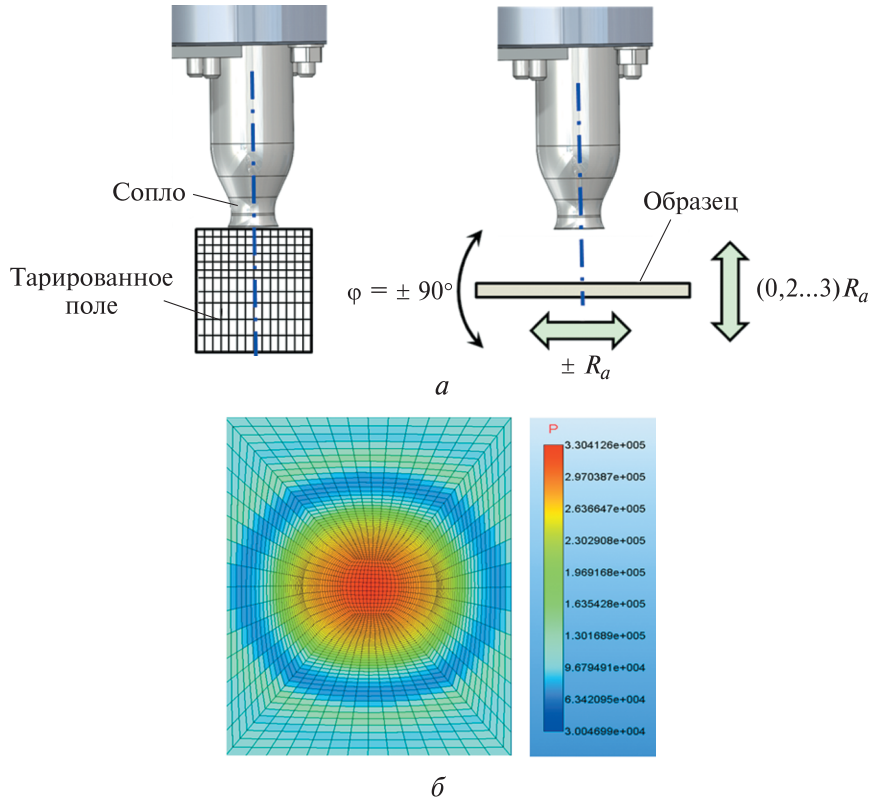
**Рис. 1.** Экспериментальная установка для моделирования интенсивного теплосилового воздействия газовой среды

Тарировочные пластины двух видов предназначались для исследований поля тепловых потоков и поля давлений. Тепловые потоки восстанавливали путем решения обратной задачи теплопроводности по показаниям термопар, приваренных к тонкой пластине в четырех точках. Давление измеряли датчиками, соединенными трубками с дренажными отверстиями в четырех точках на пластине.

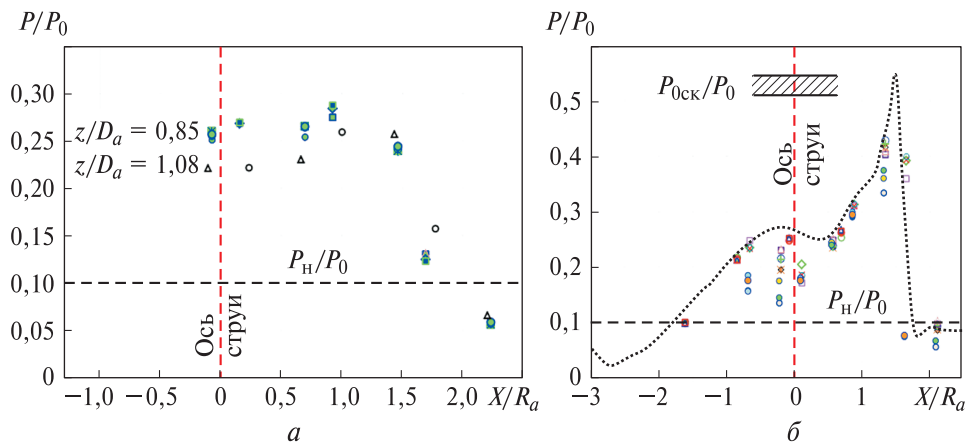
Координатное устройство позволяет устанавливать пластины под разными углами относительно оси струи и на различном расстоянии от среза сопла (рис. 2). Тарировку проводили в пределах первой «бочки» струи, длина которой соответствовала  $(2...3)R_a$  в зависимости от режима запуска ( $R_a$  — радиус среза сопла), под углами  $\varphi = 90^\circ$  и  $45^\circ$  относительно оси струи. На рис. 3 приведены примеры тарировки для одного из режимов по давлению на фронтальной и наклонной пластинах при разном удалении  $z/D_a$  от среза сопла относительно его диаметра ( $z$  — расстояние от среза сопла до пластины вдоль оси сопла;  $D_a$  — диаметр среза сопла,  $P_n$  — невозмущенное давление на пластине,  $P_0$  — давление торможения в струе;  $X$  — расстояние от оси струи вдоль пластины).

Аналогичные исследования проведены для тарировки по тепловому потоку. Поля параметров получены для множества рабочих режимов установки, при температуре торможения струи 1900...3400 К,

давление торможения за прямым скачком уплотнения  $P_{0ск}$  составляло 0,5...0,55 МПа. В зависимости от соотношения массовых расходов кислорода и углеводородного горючего может быть сформирован окислительный или восстановительный поток газа.



**Рис. 2.** Поле тарировки параметров струи при угле  $\varphi = 90^\circ$ :  
 а — схема получения тарированного поля течения; б — пример расчетного распределения давления на фронтальной пластине



**Рис. 3.** Пример тарировки по давлению для одного из режимов при угле  $\varphi = 90^\circ$  (а) и  $45^\circ$  (б)

Проведены исследования по получению газодинамических потоков с высоким содержанием сажи для изучения сажеотложения на поверхности образцов.

По результатам определения давлений и тепловых потоков могут быть рассчитаны напряжения трения и градиенты давления в поле исследований, которые необходимы для моделирования теплосилового воздействия на образец. По распределению давления и теплового потока на тестовых плоских образцах, установленных фронтально и под углом к оси струи, определены градиенты давления и напряжения трения, которые могут быть смоделированы для исследования образцов в диапазонах значений  $0...19$  МПа/мм и  $0,2...5$  кПа соответственно.

**Сравнение параметров потока предлагаемой установки с существующими аналогами.** Проведем сравнение доступных диапазонов параметров воздействия на образец предлагаемой в данной работе газодинамической установки (ГДУ) с параметрами других установок, используемых при испытаниях материалов: высокочастотного плазмотрона (ВЧП), электродуговой установки (ЭДУ) и гиперзвуковой аэродинамической трубы (АДТ). Для сравнения выберем следующие параметры:

– полная энтальпия потока  $i_0 = c_p T_0$ ;

– число Стантона  $St = \frac{q}{(\rho u)_a (i_0 - i_w)}$ ;

– поток массы по параметрам на срезе сопла  $(\rho u)_a$ .

Здесь обозначены:  $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении потока;  $T_0$  — температура торможения потока;  $q$  — тепловой поток на поверхности тестовой пластины;  $i_w$  — энтальпия потока, соответствующая температуре стенки.

Для сравнения на рис. 4 приведены диаграммы указанных выше параметров различных установок. Поток в ВЧП [12–16] отличается высокой энтальпией в диапазоне значений  $5...55$  МДж/кг при числах Стантона  $St \leq 0,15$ , характерных для перехода от сплошного к промежуточному режиму течения при потоке массы до  $25$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Числа  $St$  приведены для точки полного торможения сферического затупления радиусом  $25$  мм.

Гиперзвуковые АДТ с ВЧ-подогревателем, которые применяют для испытаний материалов [17], отличаются умеренными диапазонами энтальпии и потока массы при меньших числах Стантона, более характерных для сплошного обтекания образца.

Параметры ЭДУ, применяемых для испытаний материалов [3], характеризуются сплошным режимом течения и большим по сравнению с ВЧП и АДТ потоком массы.

Представляемая в данной работе ГДУ отличается более высоким потоком массы при режиме течения сплошной среды ( $St < 0,02$ ) и сопоставимой с АДТ и ЭДУ полной энтальпией потока. Высокий поток массы позволяет воспроизводить интенсивное силовое воздействие высокоэнтальпийного потока среды на исследуемые образцы материалов.

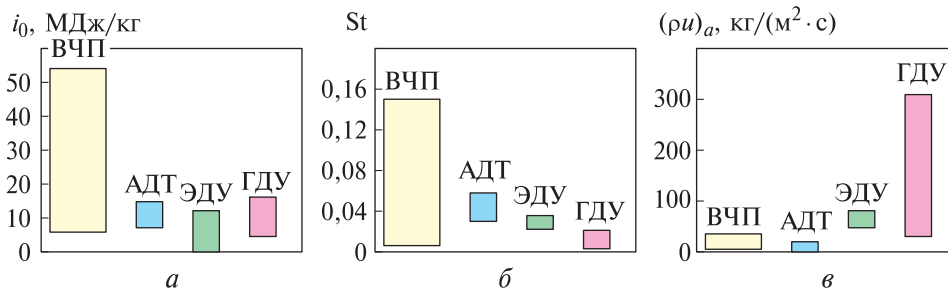


Рис. 4. Диапазоны рабочих параметров установок для испытаний образцов разных видов:

$a$  — полная энтальпия потока  $i_0$ ;  $b$  — число Стантона;  $c$  — поток массы  $(\rho u)_a$

Одним из определяющих условий при выборе режимов испытаний является сопоставление диапазонов тепловых потоков и давлений на поверхности образца. На рис. 5 представлены указанные типовые зависимости для установок рассматриваемых типов. Согласно рисунку, поток плазмотронов оказывает тепловое воздействие в широком диапазоне значений, но при меньшем давлении по сравнению с воздействием струй ЭДУ и рассматриваемой в данной работе ГДУ.

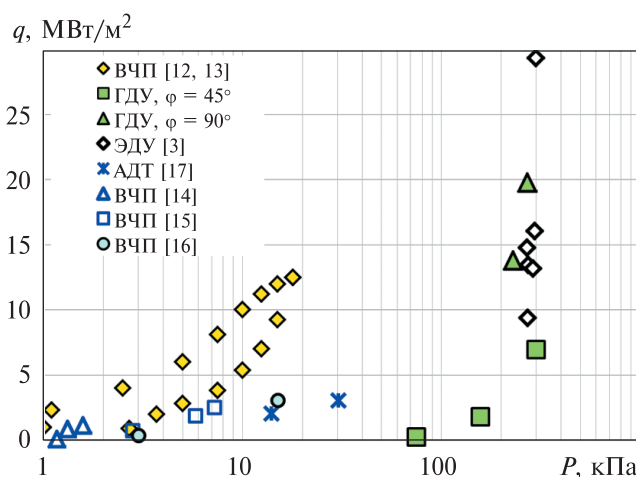
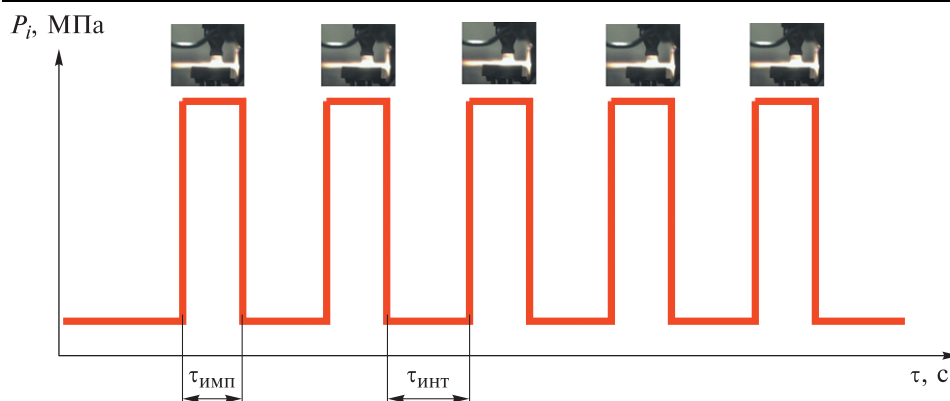


Рис. 5. Соотношение диапазонов тепловых потоков  $q$  и давлений  $P$  на образце для различных установок





**Рис. 6.** Схема импульсного воздействия струи на образец:  
 $P_i$  — давление на образце, создаваемое при импульсном включении ГДУ;  $\tau$  — время испытаний

Предлагаемая ГДУ создает тепловой поток на перпендикулярной к оси струи тарировочной пластине в диапазоне  $10...20 \text{ МВт/м}^2$  при давлении на поверхности  $100...300 \text{ кПа}$ , а для пластины, размещенной под углом  $45^\circ$ , — от  $0,2$  до  $8 \text{ МВт/м}^2$  при давлении  $70...300 \text{ кПа}$ .

Помимо непрерывного стационарного воздействия проведены исследования по реализации импульсного действия струи на образец материала (рис. 6). Полученные результаты могут быть использованы при изучении циклической стойкости материалов в условиях нестационарного теплосилового воздействия газового потока. Импульсная работа характеризуется длительностью импульсов  $\tau_{\text{имп}}$  и интервалов  $\tau_{\text{инт}}$  между ними, которые выбирают в соответствии с программой исследования образцов материалов.

Во время работы ГДУ струя формируется сжиганием углеводородного горючего (керосина, спирта, метана) или водорода в кислороде. Изменением соотношения массовых расходов реагирующих компонентов можно получать поток восстановительного или окислительного типа соответственно при избытке или недостатке кислорода относительно стехиометрического значения. При формировании струи сжиганием керосина в кислороде получен газодинамический поток с высоким содержанием сажи, что позволило проводить исследования сажеотложения на поверхности материалов.

Выполненные исследования предоставляют дополнительные возможности для испытаний образцов материалов, применяемых в условиях высоких и критических теплосиловых нагрузок газовой среды, для изучения их свойств и ресурсных характеристик при стационарном и импульсном воздействиях. В качестве объектов испытаний могут выступать образцы из металлов, композитных материа-

лов, образцы для испытания стойкости покрытий, многослойные конструкции и защитные тканевые материалы.

#### **Выводы.**

1. Представлены результаты получения высокоэнтальпийного высоконапорного потока, формируемого разработанной газодинамической установкой при реакции горения углеводородного горючего или водорода с кислородом в камере и с последующим ускорением в сопле до сверхзвуковой скорости, для исследования теплосиловой стойкости образцов различных материалов.

2. Проведен сравнительный анализ параметров газодинамических потоков, создаваемых традиционными установками (плазмотронами, аэродинамическими трубами, электродуговыми установками) и предлагаемой газодинамической установкой, которая позволяет реализовать тепловое воздействие в широком диапазоне тепловых потоков при более высоких давлениях на поверхности образцов.

3. Полученная в работе газовая струя отличается наибольшим значением потока массы, сплошностью течения, высокими тепловыми потоками и давлениями на образце, что актуально для исследований интенсивного теплосилового нагружения.

4. Реализованы возможности как стационарного, так и импульсного воздействия потока на образец, формирования восстановительной и окислительной среды в потоке, получения потока с высоким содержанием сажи.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Горский В.В., Оленичева А.А., Риш В.Г. Определение физических свойств углеродных материалов по результатам абляционных экспериментов, проведенных в струях газодинамических установок. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.*, 2015, № 10, с. 126–140. DOI: 10.7463/1015.0814845
- [2] Горский В.В., Ковальский М.Г., Риш В.Г. Определение абляционных свойств УУКМ на базе анализа результатов эксперимента в струе продуктов сгорания. *Научные материалы Международной молодежной научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии», посвященной 105-летию со дня рождения академика В.Н. Челомея*. Реутов, 28.05.2019, с. 45–46.
- [3] Gorskii V.V., Zolotarev S.L., Olenicheva A.A. Computational and experimental investigations into the mass loss of a carbon material in the sublimation regime of its thermochemical destruction. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 1, p. 163–167. DOI: 10.1007/s10891-015-1178-6
- [4] Lundell J.H., Dickey R.R. Graphite ablation at high temperatures. *AIAA Paper*, 1971, no. 71-418.
- [5] Ершова Т.В., Косарев В.Ф., Михатулин Д.С. Влияние температуры сверхзвукового гетерогенного потока на переход эрозия–напыление. *Теплофизика и аэромеханика*, 2006, т. 13, № 4, с. 583–594.

- [6] Горский В.В., Гордеев А.Н., Дмитриева А.А., Ковальский М.Г. Методика решения обратных задач математической физики по определению эффективных физических свойств углеродных материалов абляционной тепловой защиты. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-8-1789
- [7] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Development of Elements of Reusable Heat Shields from a Carbon–Ceramic Composite Material 1. Theoretical Forecast. *J. Eng. Phys. Thermophy*, 2019, vol. 92, no. 1, pp. 89–94. DOI: 10.1007/s10891-019-01910-0
- [8] Caughman J.B.O., Goulding R.H., Biewer T.M., et al. Plasma source development for fusion-relevant material testing. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2017, vol. 35, art. 03E114. DOI: 10.1116/1.4982664
- [9] Cheng X., Qu Z., He R., Ai S., Zhang R., Pei Y., Fang D. An ultra-high temperature testing instrument under oxidation environment up to 1800 °C. *Review of Scientific Instruments*, 2016, no. 87, art. 045108. DOI: 10.1063/1.4944484
- [10] Thirugnanasambantham K.G., Natarajan S. Degradation through erosion: Mechanics studies on IN-718 superalloy under hot air jet conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, vol. 24, iss. 5, pp. 2605–2613. DOI: 10.1007/s11665-015-1538-6
- [11] Tabacoff W. Erosion resistance of superalloys and different coatings exposed to particle flows at high temperature. *Surf. Coat. Technol.*, 1999, vol. 120–121, pp. 542–547.
- [12] Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Новые режимы течения и теплообмена плазмы в высокочастотном плазмотроне ВГУ-4. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2008, т. 7. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/453/> (дата обращения 08.12.2020).
- [13] Горский В.В., Гордеев А.Н., Дмитриева А.А., Колесников А.Ф. ВЧ-плазмотрон ВГУ-4 ИПМех РАН как инструмент для исследований кинетики гетерогенных химических реакций, протекающих на поверхности углеродного материала. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2017, т. 18 (2). URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-2/articles/736/> (дата обращения 08.12.2020).
- [14] Егоров И.В., Жестков Б.Е., Шведченко В.В. Определение каталитической активности материалов при высоких температурах в гиперзвуковой трубе ВАТ-104. *Ученые записки ЦАГИ*, 2014, т. XLV, № 1, с. 3–13.
- [15] Василевский Э.Б., Жестков Б.Е., Сахаров В.И. Численное моделирование и эксперимент на индукционном плазмотроне АДТ ВАТ-104. *Ученые записки ЦАГИ*, 2016, т. XLVII, № 5, с. 3–13.
- [16] Красильников А.В., Залогин Г.Н., Рудин Н.Ф., Губанов А.Е. Измерения тепловых потоков на покрытиях различного состава в дозвуковом потоке ВЧ-плазмотрона. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2016, т. 17 (2). URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/20016-17-2/articles/658/> (дата обращения 02.12.2020).
- [17] Ваганов А.В., Скуратов А.С., Штапов В.В., Ходжаев Ю.Д., Юдин В.М. Исследование термостойкости передних кромок конструкции ГЛА в высокотемпературном газовом потоке. *Прочность конструкций летательных аппаратов. Тезисы докладов научно-технической конференции*. 2013, с. 35–37.

Статья поступила в редакцию 25.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Мосолов С.В., Партола И.С., Кудинов А.С., Юрченко И.И., Клименко А.Г., Федоров С.А. Моделирование интенсивного теплосилового воздействия газовой среды для испытаний образцов в широком диапазоне параметров. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-12-2038>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства «Королёвские чтения — 2020», Москва, 29–31 января 2020 г.*

**Мосолов Сергей Владимирович** — канд. физ.-мат. наук, и.о. заместителя генерального директора по качеству ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». e-mail: [kerc@elnet.msk.ru](mailto:kerc@elnet.msk.ru)

**Партола Игорь Станиславович** — д-р техн. наук, заместитель начальника отделения ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». e-mail: [partola@kerc.msk.ru](mailto:partola@kerc.msk.ru)

**Кудинов Александр Сергеевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». e-mail: [kudinov@kerc.msk.ru](mailto:kudinov@kerc.msk.ru)

**Юрченко Ирина Ивановна** — д-р техн. наук, главный научный сотрудник ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». e-mail: [kerc@elnet.msk.ru](mailto:kerc@elnet.msk.ru)

**Клименко Александр Геннадьевич** — ведущий инженер ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». e-mail: [klimenkokerc@mail.ru](mailto:klimenkokerc@mail.ru)

**Федоров Сергей Алексеевич** — инженер ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». e-mail: [kerc@elnet.msk.ru](mailto:kerc@elnet.msk.ru)

## **Simulation of intense heat-power effect of a gas environment for testing samples in a wide range of parameters**

© S.V. Mosolov, I.S. Partola, A.S. Kudinov, I.I. Yurchenko,  
A.G. Klimenko, S.A. Fedorov

Keldysh Research Center, Moscow, 125438, Russia

*The results of the work extend the available range of the parameters of gas acting on the samples of materials and coatings being tested under intense heat and power loads to study their properties and resource characteristics under stationary and pulsed exposure. A feature of the conditions proposed in this work for testing samples, distinguishing them from most common existing methods, is the simultaneous impact of a high temperature flux and high-pressure flow on the sample surface, the possibility of obtaining an oxidizing or reducing medium with different chemical compositions, as well as a pulsed cyclic effect on a material sample. The high performance of the experimental setup allows for up to 10 sample tests per day. To perform the research of the samples, a supersonic gas jet with nominal mode regimes was modeled. The jet was generated by gas dynamics facility through carbohydrate and oxygen mixture combustion and flow acceleration in Laval nozzle. Test sample can be positioned under various angles relative to the jet axis and on the desired distance from the nozzle edge. If necessary, the sample can be provided with measurement devices allowing measurements of temperature, heat flow and pressure. In order to provide a calibrated effect on the samples, the fields of jet parameters were studied using calibration plates provided with surface pressure sensors and thermocouples for determining heat fluxes. As a result, parameter fields of pressure, heat fluxes, pressure gradients, and friction stresses on the surface of samples were obtained depending on samples orientation and gas jet thermodynamic properties. Considering these field of parameters, tests can be performed to study the properties of materials. Metal and composite materials can be used as test samples as well as samples for testing the durability of coatings, multi-layer structures and protective fabric materials.*

**Keywords:** gas dynamic facility, heat and force loads, material samples, material testing

### REFERENCES

- [1] Gorsky V.V., Olenicheva A.A., Rish V.G. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tehnicheskiy zhurnal — Science and Education*, 2015, no. 10, pp. 126–140. DOI: 10.7463/1015.0814845
- [2] Gorsky V.V., Kovalsky M.G., Rish V.G. *Opredeleniye ablyatsionnykh svoystv UUKM na baze analiza rezultatov eksperimenta v strue produktov sgoraniya* [Determination of the ablation properties of CCCM on the basis of the analysis of the results of the experiment in a jet of combustion gases]. *Nauchnyye materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Aerokosmicheskie tekhnologii», posvyashchennoy 105-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.N. Chelomeya* [Proceedings of the International Youth Scientific and Technical Conference “Aerospace Technologies” dedicated to the 105th anniversary of the birth of Academician V.N. Chelomey]. Reutov, May 28, 2019, pp. 45–46.
- [3] Gorsky V.V., Zolotarev S.L., Olenicheva A.A. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 163–167. DOI: 10.1007/s10891-015-1178-6

- [4] Lundell J.H., Dickey R.R. *AIAA Paper*, 1971, no. 71-418.
- [5] Ershova T.V., Kosarev V.F., Mikhatulin D.S. *Teplofizika i aromechanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2006, vol. 13, no. 4, pp. 583–594.
- [6] Gorsky V.V., Gordeev A.N., Dmitrieva A.A., Kovalsky M.G. *Inzhenerny zhurnal: Nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-8-1789
- [7] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhaylovsky K.V. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, pp. 89–94. DOI: 10.1007/s10891-019-01910-0
- [8] Caughman J.B., Goulding R.H., Biewer T.M., Rapp J., Diem S.J., Martin E., Bigelow T.S., et al. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2017, vol. 35, art. 03E114. DOI: 10.1116/1.4982664
- [9] Cheng X., Qu Z., He R., Ai S., Zhang R., Pei Y., Fang D. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, art. 045108. DOI: 10.1063/1.4944484
- [10] Thirugnanasambantham K.G., Natarajan S. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, vol. 24, no. 7, pp. 2605–2613. DOI: 10.1007/s11665-015-1538-6
- [11] Tabacoff W. Erosion Resistance of Superalloys and Different Coatings Exposed to Particle Flows at High Temperature. *Surface Coating Technology*, 1999, vol. 120-121, pp. 542–547.
- [12] Gordeev A.N., Kolesnikov A.F. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike — Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2008, vol. 7. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/453/> (accessed December 8, 2020).
- [13] Gorsky V.V., Gordeev A.N., Dmitrieva A.A., Kolesnikov A.F. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike — Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2017, vol. 18 (2). Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2017-18-2/articles/736/> (accessed December 8, 2020).
- [14] Egorov I.V., Zhestkov B.E., Shvedchenko V.V. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2014, vol. XLV, no. 1, pp. 3–13.
- [15] Vasilevsky E.B., Zhestkov B.E., Sakharov V.I. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2016, vol. XLVII, no. 5, pp. 3–13.
- [16] Krasilnikov A.V., Zalugin G.N., Rudin N.F., Gubanov A.E. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2016, vol. 17 no. 2. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/20016-17-2/articles/658/> (accessed December 2, 2020).
- [17] Vaganov A.V., Skuratov A.S., Shtapov V.V., Khodzhaev Yu.D., Yudin V.M. Issledovanie termostoykosti perednikh kromok konstruktssii GLA v vysokotemperaturnom gazovom potoke [Study of the thermal stability of the leading edges of the GLA structure in a high-temperature gas flow]. *Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Prochnost konstruktssiy letatelnykh apparatov”* [Proceedings of the scientific and technical conference “Structural strength of aircraft”. Abstracts]. 2013, pp. 35–37.

**Mosolov S.V.** (b. 1963) graduated from Moscow Institute of Physics and Technology in 1983, Cand. Sc. (Phys.-and-Math.), Deputy Director General, Keldysh Research Center. e-mail: [kerc@elnet.msk.ru](mailto:kerc@elnet.msk.ru)

**Partola I.S.** (b. 1965) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1988, Dr. Sc. (Eng.), Keldysh Research Center, Deputy Head of Division. e-mail: [partola@kerc.msk.ru](mailto:partola@kerc.msk.ru)

**Kudinov A.S.** (b.1980) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2003, Cand. Sc. (Eng.), Keldysh Research Center Deputy Head of Department.  
e-mail: kudinov@kerc.msk.ru

**Yurchenko I.I.** (b. 1960) graduated from Moscow Institute of Physics and Technology in 1983, Dr. Sc. (Eng.), Keldysh Research Center, Chief Research Scientist.  
e-mail: kerc@elnet.msk.ru

**Klimenko A.G.** (b. 1972) graduated from Moscow Aviation Institute in 1995, Keldysh Research Center, Lead Engineer. e-mail: klimenkokerc@mail.ru

**Fedorov S. A.** (b. 1990) graduated from Moscow Aviation Institute in 2012, engineer, Keldysh Research Center. e-mail: kerc@elnet.msk.ru