ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2001, том 39, № 5, с. 788–793

УДК 536.24:536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ПОРИСТЫМ ТРАКТОМ ОХЛАЖДЕНИЯ

© 2001 г. Д. А. Ягодников

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию 22.12.98 г.

Исследовано воздействие внешнего электрического поля на характеристики тепломассообмена в камере сгорания, тракт охлаждения которой заполнен пористым материалом. Установлено, что в случае приложения к камере сгорания постоянного отрицательного потенциала 900 В поток тепла от продуктов сгорания к огневой стенке увеличивается (в ~2.7 раза), а в случае положительного потенциала – уменьшается. Полученные данные объясняются влиянием ионного ветра, который, взаимодействуя с пограничным слоем стенки, обусловливает изменение его геометрических и теплофизических параметров, а также приводит к изменению поверхности пламени. Обнаруженный эффект может быть использован для создания эффективной системы охлаждения камер сгорания энергетических установок.

ВВЕДЕНИЕ

Способы интенсификации теплоотдачи можно разделить на пассивные, не требующие непосредственных затрат энергии извне, и активные, требующие прямых затрат энергии от внешнего источника. Пассивные методы [1] включают использование специальной физико-химической обработки поверхностей; шероховатых и развитых поверхностей; устройств, обеспечивающих перемешивание и закручивание потока; способов воздействия на поверхностные натяжения жидкости; добавление примесей в теплоноситель. Активные методы реализуются при помощи механического воздействия (вдув и отсос теплоносителя; вибрация поверхностей теплообмена, пульсации потока жидкости) и внешних электростатических полей [1, 2]. Для камер сгорания (КС) двигательных установок обеспечение допустимого теплового состояния стенок проточной части является одной из основных задач. Учитывая большие значения плотностей тепловых потоков ~10^6–10^8 Вт/м^2 [3], для надежного охлаждения камер сгорания перспективной можно считать комбинацию двух или более приведенных выше методов интенсификации, например наложение электрического поля на теплообменный тракт, заполненный пористым металлическим материалом.

Разработке систем тепловой защиты с использованием пористых элементов форсуночных головок и стенок камер сгорания посвящено большое число исследований [4–6]. Влияние внешнего электрического поля (ВЭП) на характеристики тепломассообмена изучено, в основном, на теплообменных аппаратах, где теплообмен не связан с процессами горения [1]. Исследования воздействия ВЭП на процесс передачи тепла от продуктов сгорания к охлаждаемой стенке носят ограниченный характер и проведены в условиях естественной конвекции [7, 8].

В связи с изложенным цель данной работы состоит в определении влияния внешнего электрического поля на характеристики тепломассообмена в модельной камере сгорания с трактом охлаждения, заполненным пористым металлом.

Модельная установка и методика проведения эксперимента

Для исследования влияния ВЭП на особенности процесса передачи тепла от газообразных продуктов сгорания к огневой стенке разработана экспериментальная установка, позволяющая обеспечить подачу, перемешивание и сжигание газообразных компонентов на различных режимах (рис. 1). Установка включает в себя камеру сгорания, магистрали подачи газообразных окислителя (воздуха) и горючего (пропана), охлаждающего компонента (воздуха), а также системы измерения и регистрации.

Камера сгорания. Экспериментальная модель выполнена в виде цилиндрической камеры *1* с внутренним диаметром 40 мм и длиной 100 мм, в которой при атмосферном давлении сжигалась предварительно перемешанная пропановоздушная смесь (коэффициент избытка окислителя α = = 0.42–0.75; адиабатическая температура горения T^* = 1600–2100 K). На выходе из камеры сгорания устанавливалось сопло *3* диаметром 10 мм.

Магистраль охлаждающего компонента. Охлаждение огневой стенки осуществлялось возду-

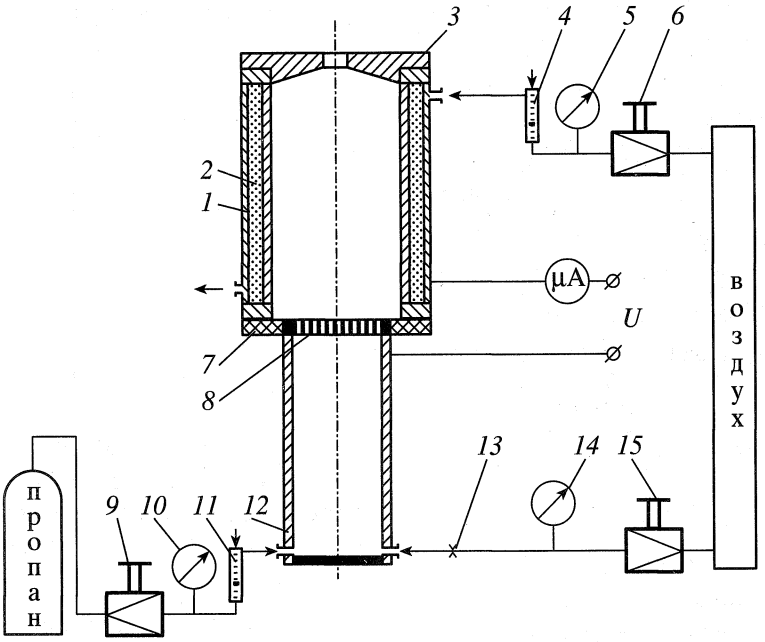

Рис. 1. Схема установки: *1* – камера сгорания; *2* – пористый материал; *3* – сопло; *4*, *11* – ротаметры; *5*, *10*, *14* – манометры; *6*, *9*, *15* – редуктора; *7* – изолятор; *8* – перфорированная пластина; *12* – смесительная камера; *13* – мерная шайба.

хом, подаваемым по схеме противотока в щелевой тракт между внутренней и наружной оболочками. Этот концентрический зазор толщиной 3 мм заполнен пористым сетчатым материалом *2* (пористость 0.54), изготовленным методом диффузионной сварки в вакууме тканой фильтровой сетки П60 (ГОСТ 3187-76) из нержавеющей проволоки 12Х18Н10Т. Массовый расход воздуха задавался и контролировался с помощью ротаметра *4* типа РМЗА-0.25ГУЗ, на который газ поступал от воздушной рампы через редуктор *6*.

Магистраль подачи окислителя. От воздушной рампы высокого давления воздух поступал на редуктор *15*, с помощью которого задавалось давление перед мерной шайбой *13*. На последней реализовывался сверхкритический перепад давления, и поэтому расход воздуха однозначно определялся давлением перед шайбой.

Магистраль подачи горючего. Из баллона со сжиженным пропаном через редуктор *9* газ поступает на ротаметр *11*, задающий массовый расход горючего. Для контроля давления в газовых магистралях используются манометры.

Смешение горючего и окислителя происходило в смесительной камере *12* (внутренний диаметр 30 мм, длина 265 мм), в верхней части которой устанавливалась перфорированная пластина (84 отверстия диаметром 1.7 мм, коэффициент живого сечения 0.27), служащая для стабилизации пламени.

Система измерений экспериментальной установки предназначена для регистрации следующих параметров: расходов воздуха и пропана, температуры огневой стенки камеры сгорания, температуры охлаждающего воздуха.

Температура охлаждающего воздуха измерялась на входе и выходе в рубашку охлаждения с помощью ртутного термометра (ТЛ-32) с пределом измерений 30–200°С (цена деления 1°С). Для измерения температуры огневой стенки применялись термопары типа хромель–копель с диаметром спая 0.5 мм, установленные посередине КС на глубине 3 мм (термопара T_1) и 1 мм (термопара T_2) от поверхности огневой стенки соответственно.

Электрическое поле создавалось между электрически изолированными перфорированной пластиной (*8*, рис. 1) и корпусом КС за счет приложения постоянного напряжения 900 В. Таким образом реализовывалась схема наложения поперечного поля, позволяющая организовать более эффективное воздействие на отдельные стадии рабочего процесса в камере сгорания [9]. Поскольку исследовалось влияние допробойного поля, то корпус горелки и камера сгорания электрически изолировались с помощью текстолитового фланца (*7*, рис. 1).

Основными варьируемыми параметрами являлись расходы компонентов топливной смеси и охлаждающего воздуха, а также полярность прикладываемого напряжения. В процессе эксперимента регистрировались температура воздуха на входе и выходе из тракта охлаждения, скорость срыва пламени топлива, а также ионизационный ток с помощью микроамперметра. Значения предельных погрешностей регистрации определяю-

Таблица 1. Погрешность регистрации определяющих и определяемых параметров

№ п/п	Параметр	Погрешность
1	Ионизационный ток, i, мкА	±1.6%
2	Секундный массовый расход охлаждающего воздуха, $\dot{m}_a$, г/с	±4%
3	Секундный массовый расход топлива, $\dot{m}_f$, г/с	±5.6%
4	Скорость срыва пламени, v_b, м/с	±6%
5	Коэффициент избытка окислителя α	±5.6%
6	Температура стенки, t_w, °С	±1.7%
7	Температура охлаждающего воздуха, t_a, °С	±1.2%

щих и определяемых параметров представлены в табл. 1.

Анализ результатов исследований

С целью изучения влияния ВЭП как на процессы тепломассообмена, так и на процессы горения топлива в КС в первой серии эксперименты проводились на рабочем участке, особенностью которого являлось отсутствие нижнего фланца (*7*, рис. 1), т.е. камера снизу была открыта. Данная конструкция позволяла визуализировать особенности стабилизации пламени на перфорированной пластине и горения пропановоздушной смеси при наложении ВЭП различной полярности.

В случае приложения к корпусу отрицательного потенциала температура охлаждающего воздуха t_a увеличивается на ~3.3% по сравнению с отсутствием ВЭП (рис. 2), что свидетельствует о возрастании потока тепла от продуктов сгорания к стенке. В эксперименте, когда на камеру подается положительный потенциал, характер воздействия ВЭП изменялся. Так, при расходе охлаждающего воздуха $\dot{m}_a$ = 0.084 г/с температура охлаждающего компонента уменьшается на 12.5%.

Кроме того, при положительном потенциале на КС зарегистрировано расширение границ устойчивости пламени, которое можно оценить по увеличению скорости срыва V_b пламени от 1.61 м/с (U = 0) до 1.95 м/с (U = 0.9 кВ). В случае изменения полярности интенсифицирующее воздействие ВЭП на процессы воспламенения и горения оказалось менее значительным: V_b = 1.76 м/с. Из анализа зависимости ионизационного тока от времени (рис. 3) следует, что увеличение значений i качественно соответствует характеру увеличения температу-

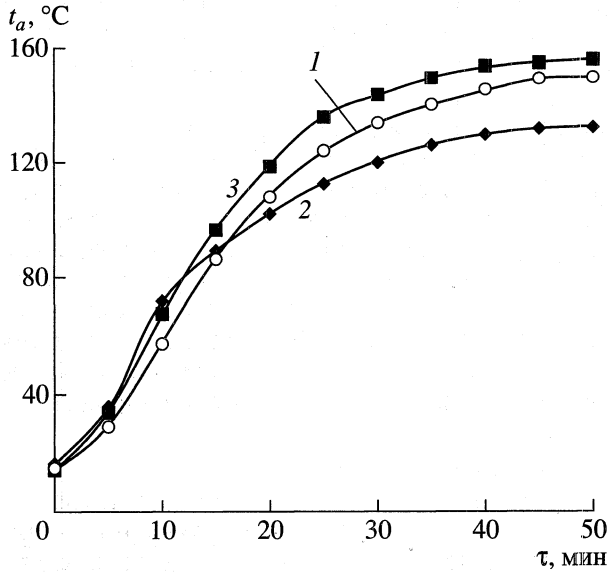

Рис. 2. Изменение температуры охлаждающего компонента в зависимости от времени: $\dot{m}_a$ = 0.15 г/с, $\dot{m}_f$ = 0.108 г/с; α = 0.42, T^* = 1600 К; U, кВ: *1* – 0, *2* – 0.9, "+" КС; *3* – 0.9, "–" КС.

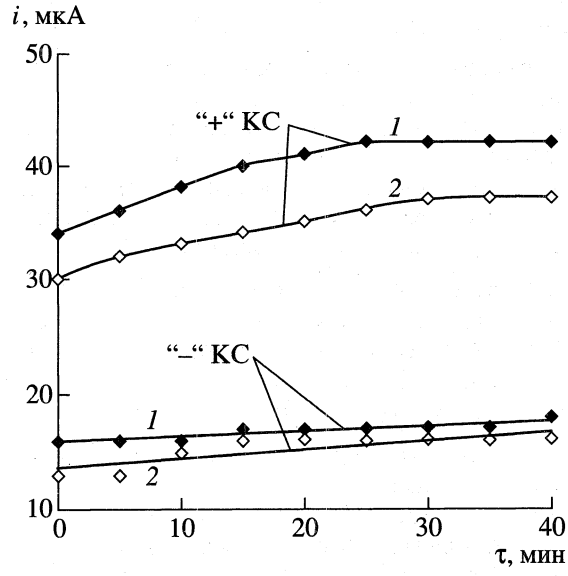

Рис. 3. Ионизационный ток в пламени $\dot{m}_f$ = 0.108 г/с; α = 0.42, T^* = 1600 К; $\dot{m}_a$, г/с: *1* – 0.084; *2* – 0.15.

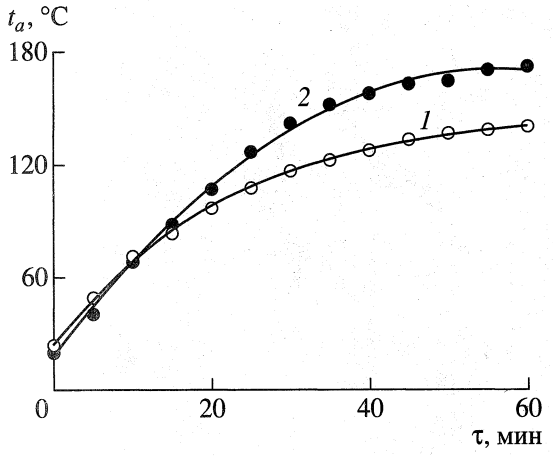

Рис. 4. Изменение температуры охлаждающего компонента в зависимости от времени: $\dot{m}_a$ = 0.21 г/с, $\dot{m}_f$ = = 0.14 г/с; α – 0.75; T^* = 2220 K; U, кВ: *1* – 0, *2* – 0.9.

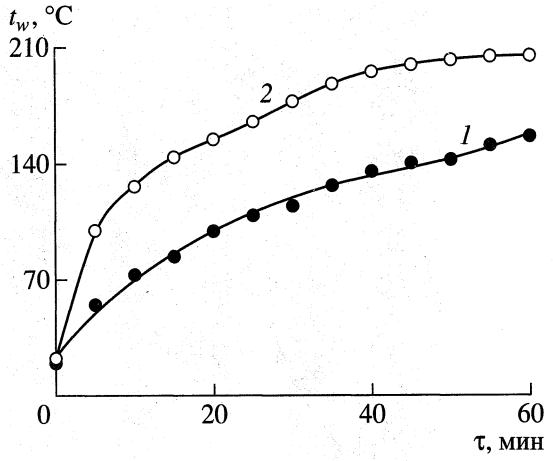

Рис. 5. Изменение температуры огневой стенки в зависимости от времени: $\dot{m}_a$ = 0.21 г/с, $\dot{m}_f$ = 0.14 г/с, α = 0.75, *1* – U = 0 кВ, термопара T_2; *2* – U = 0.9 кВ, термопара T_1.

ры охлаждающего теплоносителя и, следовательно, огневой стенки КС.

К камере сгорания с прикрепленным нижним фланцем, который одновременно служил электрической изоляцией между камерой смешения и камерой сгорания, учитывая рассмотренные выше данные, прикладывался отрицательный потенциал. Результаты показывают, что в этом случае температура охлаждающего воздуха на выходе из КС увеличивается на ~23% (рис. 4), а температура огневой стенки – на ~31% (рис. 5). Зарегистрированное увеличение ионизационного тока в продуктах сгорания (рис. 6) по сравнению с аналогичной полярностью ВЭП на открытой КС (рис. 3) объясняется соответствующим возрастанием температуры рабочего тела и массового расхода топлива, что согласуется с теорией электризации в высокотемпературных ионизированных потоках [10].

Полученные результаты свидетельствуют об интенсификации процессов тепломассообмена, воспламенения и горения топлива, которые могли быть вызваны следующими причинами. При создании разности потенциалов между перфорированной пластиной и стенкой камеры возникает направленное движение свободных электронов к аноду и положительных ионов к катоду. Причем поток движущихся положительных ионов образует ионный ветер, который захватывает микрообъемы продуктов сгорания [9]. В случае положительного потенциала камеры сгорания этот поток направлен к перфорированной пластине. В результате изменяется гидродинамическая картина течения в камере сгорания: протяженность пламени уменьшается, и оно "наползает" на перфорированную пластину (рис. 7б), что приводит к повышению стабильности пламени и увеличению V_b. При этом одновременно уменьшается площадь поверхности стенки, непосредственно соприкасающаяся с высокотемпературной зоной пламени. Поэтому происходит снижение потока тепла в стенку и соответственно температуры охлаждающего компонента.

При изменении полярности напряжения ("–" КС) ионный ветер, направленный к огневой стенке КС, приводит к увеличению протяженности пламени (рис. 7в) и появлению на его поверхности периодических возмущений. Аналогичный результат по влиянию электрического поля на геометрию пламени получен в работе [9]. В результате возникает двойное воздействие ВЭП на механизм теплообмена: увеличение площади контакта продуктов сгорания с огневой стенкой КС и взаимодействие ионного ветра с пограничным слоем стенки, приводящее к изменению его геометрических и теплофизических параметров.

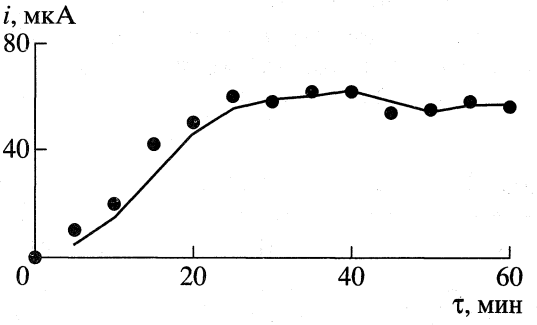

Рис. 6. Ионизационный ток в пламени: $\dot{m}_a$ = 0.21 г/с, $\dot{m}_f$ = 0.14 г/с, α = 0.75.

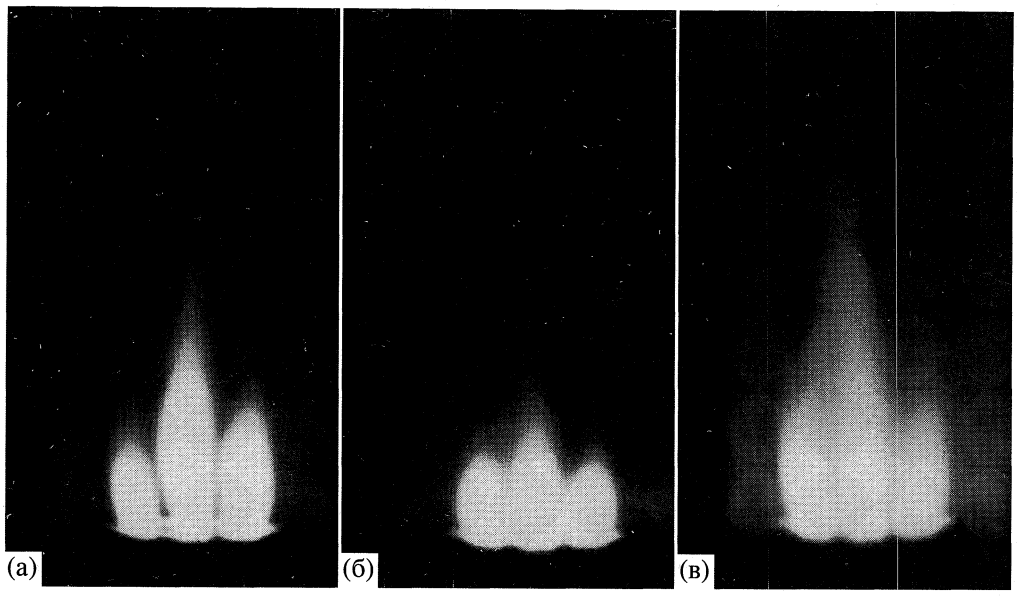

Рис. 7. Фотографии пламени у перфорированной пластины: U, кВ: а – 0, б – 0.9, "+" КС; в – 0.9, "–" КС.

Так как скорость увлекаемого ионным ветром газа, согласно [11], определяется выражением

$$v_i = (Uen_+/\rho_c)^{1/2},$$

где e – заряд электрона 1.6×10^{-19} Кл, n_+ – объемная концентрация положительных ионов, то плотность конвективного потока тепла к огневой стенке КС, обусловленная ионным ветром, будет равна

$$q_i = (Uen_+\rho_c)^{1/2} C_p T_c. \quad (1)$$

Здесь ρ_c, C_p, T_c – плотность, теплоемкость и температура продуктов сгорания пропано-воздушного пламени. Для условий проведения эксперимента при наложении ВЭП универсальная программа расчета термодинамических характеристик АСТРА-3 [12] дает следующие значения ρ_c = = 0.15 кг/м^3, C_p = 1500 Дж/кг/К, T_c = 2100 К. Равновесный ионный состав продуктов сгорания представлен в табл. 2. Тогда, согласно (1), значение q_i = 7730 Вт/м^2. Следует отметить, что полученное значение является максимально возможным, поскольку в зависимость (1) подставляются значения плотности, теплоемкости и температуры продуктов сгорания, реализуемые вблизи оси камеры сгорания (зона наибольших температур). Вследствие неравновесности процессов горения и наличия холодной периферийной зоны пламени реальное значение q_i будет меньше. Тем не менее повышение температуры стенки КС на ~50°С и охлаждающего компонента на ~30°С при наложении внешнего электрического поля свидетельствует о наличии дополнительного потока тепла к огневой стенке КС, обусловленного ионным ветром.

Зарегистрированное в эксперименте увеличение значения скорости срыва пламени V_b может быть вызвано интенсификацией химических реакций в зоне прогрева топливной смеси за счет возбуждения колебательных уровней молекул азота и кислорода при их столкновении с электронами, перемещающимися в электрическом поле (благодаря высокой подвижности) из зоны горения в область предпламенных реакций [9].

Отличие значений i при отрицательном и положительном потенциале КС (более чем в 2 раза) можно объяснить следующими причинами. Ионизационный ток, определяемый движением свободных электронов, пропорционален, с одной стороны, их скорости и концентрации, а с другой – площади токособирающей поверхности. Тогда в

Таблица 2. Объемная концентрация ионов n_+ в продуктах сгорания пропано-воздушного пламени, α = 0.75, м$^{-3}$

O^{-1}	H^{-1}	OH^{-1}	CN^{-1}	NO_2^{-1}	Свободные электроны
$1.433 \times 10^{+8}$	$4.059 \times 10^{+8}$	$3.49 \times 10^{+9}$	$3.79 \times 10^{+6}$	$0.25 \times 10^{+6}$	$2.75 \times 10^{+11}$
H_2O^{+1}	H_3O^{+1}	NO^{+1}	NH_4^{+1}	H_3^{+1}	CHO^{+1}
$3.19 \times 10^{+6}$	$2.68 \times 10^{+11}$	$9.385 \times 10^{+9}$	$1.63 \times 10^{+8}$	$5.65 \times 10^{+3}$	$9.48 \times 10^{+8}$

случае подключения КС к положительному полюсу источника питания электроны перемещаются от смесительной головки к стенке КС, где осуществляется замыкание электрической цепи. А так как площадь поверхности КС превосходит площадь перфорированной пластины, то значение i в этом случае будет больше при прочих равных условиях.

Отметим также, что при значениях напряжения ВЭП $U = 0.9$ кВ и наибольшем ионизационном токе ~40 мкА выделяемое джоулево тепло составляет $\sim 36 \times 10^{-3}$ Вт и не может оказывать интенсифицирующего воздействия на процессы воспламенения, горения и тепломассообмена.

Полученные в работе результаты позволяют сделать следующее заключение. Экспериментально установлено, что наложение ВЭП приводит к увеличению или уменьшению теплового потока от продуктов сгорания к огневой стенке в зависимости от полярности прикладываемого напряжения. Изменения в значениях q_i могут быть объяснены влиянием ионного ветра, который, взаимодействуя с пограничным слоем стенки, обусловливает изменение его геометрических и теплофизических параметров.

Автор выражает признательность Ф.В. Пелевину за помощь в обработке результатов эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bergles A.E.* Survay and Evaluation of Techniques to Augment Convective Heat and Mass Transfer. Progress in Heat and Mass Transfer. V. 1. Oxford: Pergamon Press, 1969. P. 331.
2. *Seth A.K., Lee L.* The Effect on Electric Field in the Presence of Noncondensable Gas on Film Condensation // J. Heat Transfer. 1974. V. 96. № 2. P. 257.
3. *Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др.* Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. Т. 2. М.: Высшая школа, 1993.
4. *Пелевин Ф.В.* Система тепловой защиты с межканальной транспирацией охладителя через пористый сетчатый материал. В сб.: Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ, 1997. С. 49.
5. *Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.В.* Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988.
6. *Полежаев Ю.В., Поляков А.Ф., Поцепкин В.М., Репин И.В.* Тепловые режимы пористой стенки при проницаемом охлаждении // ТВТ. 1997. Т. 35. № 1. С. 86.
7. *Пурмал М.Я.* Горение пропана в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 1981. № 2. С. 53.
8. *Заке М.В., Пурмал М.Я.* Исследование процессов горения и теплообмена в пламени пропана при воздействии внешнего электрического поля. В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение. Черноголовка: Ин-т хим. физики РАН, 1992. С. 47.
9. *Ягодников Д.А., Воронецкий А.В.* Особенности стабилизации пропановоздушного пламени при наложении продольного и поперечного электрического поля // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31. № 1. С. 40.
10. *Потапов Г.П., Дрегалин А.Ф.* Образование статического электричества при истечении из сопла ионизированного газа // Изв. вузов. Авиационная техника. 1977. № 5. С. 90.
11. *Лаутон Д., Вейнберг Ф.* Электрические аспекты горения. М.: Энергия, 1976. 296 с.
12. *Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К.* Применение ЭВМ для термодинамических расчетов. М.: Наука, 1982. 263 с.