

Исследование эффективности охлаждения резонатора газодинамической системы воспламенения на двухфазной топливной композиции

© О.А. Ворожеева, К.Ю. Арефьев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В настоящее время актуальным является увеличение ресурса работы газодинамических систем воспламенения, применяемых в современных энергетических, двигательных и технологических установках различного назначения. Добиться этого можно путем снижения тепловой нагрузки на основной элемент газодинамической системы воспламенения — резонатор. Для решения поставленной задачи возможно применение конструкций с вынесенным резонатором или с проточным охлаждением жидкостью его наружной поверхности. Исследовано тепловое состояние вынесенного резонатора и резонатора с проточным охлаждением. Определено время работы газодинамической системы воспламенения до начала разрушения вынесенного резонатора на непрерывном и импульсном режимах. Рассмотрена эффективность проточного охлаждения резонатора. Приведены рекомендации, касающиеся выбора конструктивной схемы и материала резонатора.

Ключевые слова: *тепловое состояние, газодинамическая система воспламенения, двухфазная топливная композиция, математическое моделирование, этанол, резонатор, охлаждение*

Введение. Для инициирования рабочего процесса в перспективных генераторах высокоэнтальпийных потоков (ГВП), применяемых в энергетических, двигательных и технологических установках, могут использоваться газодинамические системы воспламенения (ГСВ) [1, 2]. При этом наиболее востребованы ГСВ на двухфазной топливной композиции, например воздух + этанол [3–5].

Одним из наиболее важных элементов ГСВ является резонатор, который обеспечивает надежное воспламенение топливной смеси. Однако контакт резонатора с высокотемпературными газами (продуктами сгорания двухфазной топливной композиции) и интенсивный теплообмен в проточном тракте ГСВ приводят к значительному прогреву стенки резонатора и повышают вероятность ее термохимической эрозии и прогара [6, 7]. Известно, что прогар стенки резонатора может привести к потере работоспособности ГСВ в целом. Анализ полученных в работе [8] результатов численного исследования теплового состояния стенок резонатора в случае, когда с горячим газом контактируют все поверхности резонатора, показал, что прогар конструкции может произойти через 2,7...5,4 с непрерывной работы ГСВ или через 5,4...12,5 с импульсной работы. Для перспективных ГВП такого времени работы недостаточно, поэтому актуальным ста-

новится обеспечение длительной работоспособности ГСВ путем снижения тепловой нагрузки на резонатор.

Одним из вариантов снижения тепловой нагрузки на резонатор и увеличения времени работы ГСВ является выполнение конструкции с вынесенным резонатором (рис. 1). В этом случае тепловому воздействию со стороны горячих газов подвергается только внутренняя поверхность резонансной полости, а внешняя имеет конвективно-радиационное охлаждение.

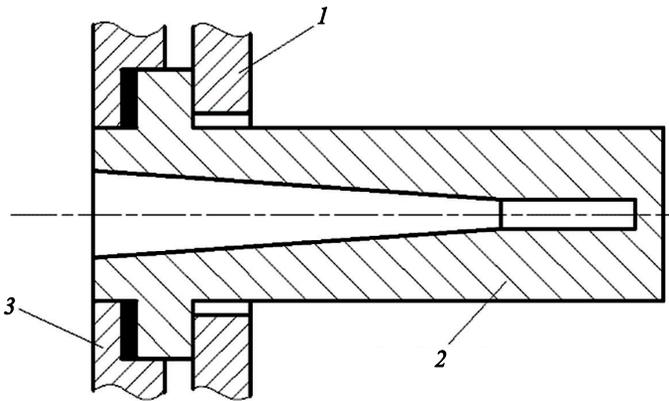


Рис. 1. Конструктивная схема расположения вынесенного резонатора:
1 — прижимной фланец; 2 — резонатор; 3 — корпус камеры ГВП

Другим вариантом решения проблемы интенсивного нагрева и прогара резонатора является его проточное охлаждение водой или непосредственно горючим (этанолом). Рассмотрены варианты конструкции резонатора с охлаждением всей наружной поверхности (рис. 2, а) и только цилиндрической ее части (рис. 2, б).

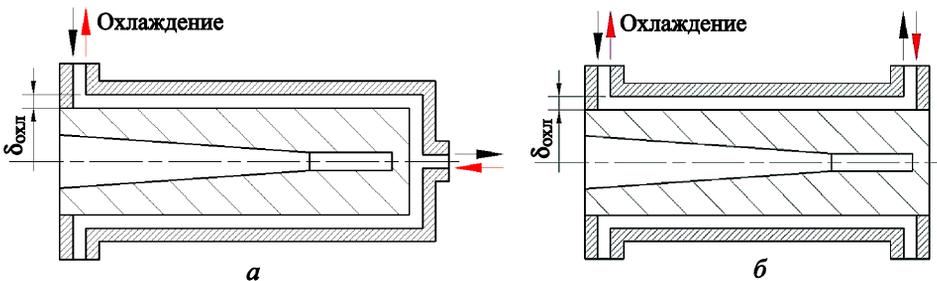


Рис. 2. Варианты конструктивных схем резонатора с проточным охлаждением всей наружной поверхности (а) и только цилиндрической части (б)

Цель работы заключается в обосновании возможности увеличения времени работы ГСВ путем оптимизации конструктивной схемы и численного анализа теплового состояния резонатора.

Математическая модель. Математическая модель расчета теплового состояния резонатора ГСВ без проточного охлаждения представлена в работе [8]. В настоящей работе рассмотрена ее адаптация для вынесенного резонатора с внешнем конвективно-радиационным охлаждением и с внешнем проточным охлаждением.

Для конструктивных схем ГСВ, представленных на рис. 1 и 2, суммарный тепловой поток $q_{\Sigma \text{вн}}$, направленный от горячих газов к внутренней поверхности стенки резонатора, состоит из двух компонентов — конвективного $q_{\text{кон. вн}}$ и радиационного $q_{\text{рад. вн}}$ тепловых потоков:

$$q_{\Sigma \text{вн}} = q_{\text{кон. вн}} + q_{\text{рад. вн}}$$

Необходимость учета радиационного теплового потока от горячего газа обусловлена тем, что при горении этанола в воздухе образуется большое количество паров воды и углекислого газа, являющихся источниками интенсивного излучения.

Следует отметить, что при импульсном режиме работы ГСВ пауза характеризуется отсутствием теплового потока к внутренней поверхности стенки резонатора.

Алгоритм расчета конвективного и радиационного тепловых потоков к внутренней поверхности стенки резонатора подробно рассмотрен в работе [8].

Для вынесенного резонатора без наружного проточного охлаждения суммарный тепловой поток $q_{\Sigma \text{н}}$, направленный от наружной поверхности резонатора в окружающую среду, состоит из конвективного (обусловленного естественной конвекцией) $q_{\text{ест}}$ и радиационного (обусловленного радиационным излучением в окружающую среду) $q_{\text{изл}}$ тепловых потоков:

$$q_{\Sigma \text{н}} = q_{\text{ест}} + q_{\text{изл}}$$

При этом естественная конвекция описывается уравнением

$$q_{\text{ест}} = \alpha_0 (T_{\text{ст.н}} - T_0),$$

где α_0 — коэффициент естественной конвекции, для стандартных условий принимается равным $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{\text{ст.н}}$ — температура наружной поверхности стенки резонатора; T_0 — температура окружающей среды.

Радиационный тепловой поток от стенки при излучении в атмосферу

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon_{\text{ст.эф}} c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{ст.н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right],$$

где $\varepsilon_{\text{ст.эф}}$ — эффективная степень черноты стенки резонатора; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана — Больцмана.

Для резонатора с наружным проточным охлаждением тепловой поток от наружной поверхности резонатора $q_{\Sigma\text{н}}$ характеризуется теплоотводом от стенки к охладителю (охлаждающей жидкости) путем вынужденной конвекции:

$$q_{\Sigma\text{н}} = q_{\text{охл}}.$$

Тепловой поток от стенки к охладителю $q_{\text{охл}}$ определяется выражением [9]:

$$q_{\text{охл}} = \alpha_{\text{охл.ж}} (T_{\text{ст.охл}} - T_{\text{охл}}),$$

где $\alpha_{\text{охл.ж}}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки к охладителю; $T_{\text{ст.охл}}$ — температура стенки со стороны охладителя; $T_{\text{охл}}$ — температура охладителя.

Суммарный тепловой поток к охладителю

$$Q_{\Sigma} = \sum_i q_{\text{охл}i} \Delta S_i = \dot{m}_{\text{охл}} C_{p\text{охл.ср}} (T_{\text{охл.вых}} - T_{\text{охл.вх}}),$$

где $q_{\text{охл}i}$ и ΔS_i — удельный тепловой поток от стенки к охладителю и площадь поверхности стенки i -го участка резонатора; $\dot{m}_{\text{охл}}$ — секундный массовый расход охладителя; $C_{p\text{охл.ср}}$ — средняя теплоемкость охладителя, определяемая при температуре $T_{\text{охл.ср}} = 0,5(T_{\text{охл.вх}} + T_{\text{охл.вых}})$; $T_{\text{охл.вх}}$ и $T_{\text{охл.вых}}$ — температура охладителя на входе и выходе.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{охл.ж}}$ от стенки к охлаждающей жидкости рассчитывается по формуле М.А. Михеева [10]:

при ламинарном режиме течения

$$\text{Nu} = 1,4 \left(\text{Re} \frac{d_{\text{э}}}{l} \right)^{0,4} (\text{Pr}_{\text{ж}})^{0,33} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{ж.ст}}} \right)^{0,25};$$

при турбулентном режиме течения

$$\text{Nu} = 0,021(\text{Re})^{0,8} (\text{Pr}_{\text{ж}})^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{ж.ст}}} \right)^{0,25},$$

где Nu , Re и $Pr_{ж}$ — числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля для охладителя; $Pr_{ж.ст}$ — число Прандтля для охладителя, взятое при температуре стенки; $d_э$ — эквивалентный (гидравлический) диаметр поперечного сечения канала охлаждения; l — длина участка охлаждающего тракта.

Из конструктивных ограничений для рассматриваемого кольцевого канала охлаждения принят $d_э = 2$ мм.

Критерии подобия определены по следующим зависимостям:

$$Nu = \frac{\alpha_{охл.ж} d_э}{\lambda_{охл.ж}}; Re = \frac{\rho_{охл.ж} w_{охл.ж} d_э}{\mu_{охл.ж}}; Pr_{ж} = \frac{\mu_{охл.ж} C_p_{охл.ж}}{\lambda_{охл.ж}},$$

где $\lambda_{охл.ж}$, $\rho_{охл.ж}$, $\mu_{охл.ж}$, $C_p_{охл.ж}$ — теплопроводность, плотность, динамическая вязкость и теплоемкость охлаждающей жидкости соответственно; $w_{охл.ж}$ — скорость течения охлаждающей жидкости в канале охлаждения.

Двумерное уравнение нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах, начальное условие для решения дифференциальных уравнений, а также граничные условия на внутренней поверхности стенки резонатора представлены в работе [8]. Далее приведены граничные условия на наружной поверхности стенки резонатора при отсутствии и наличии проточного охлаждения.

1. Граничное условие на наружной поверхности стенки вынесенного резонатора:

для цилиндрической поверхности

$$\alpha_0 (T_{ст.н} - T_0) + \varepsilon_{ст.эф} c_0 \left[\left(\frac{T_{ст.н}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] = -\lambda_{ст} (T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r},$$

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} = \frac{T_{i_{кон}, j, k} - T_{i_{кон}-1, j, k}}{\Delta r};$$

для правого торца

$$\alpha_0 (T_{ст.н} - T_0) + \varepsilon_{ст.эф} c_0 \left[\left(\frac{T_{ст.н}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] = -\lambda_{ст} (T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z},$$

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z} = \frac{T_{i, j_{кон}, k} - T_{i, j_{кон}-1, k}}{\Delta z},$$

где $\lambda_{ст}$ — теплопроводность материала стенки резонатора; r, z, τ — координаты соответственно по радиусу стенки, длине резонатора и времени.

2. Граничное условие на наружной поверхности стенки резонатора при наличии проточного охлаждения:

для цилиндрической поверхности

$$\alpha_{\text{охл}} (T_{\text{ст.охл}} - T_{\text{охл}}) = -\lambda_{\text{ст}} (T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r};$$

для правого торца

$$\alpha_{\text{охл}} (T_{\text{ст.охл}} - T_{\text{охл}}) = -\lambda_{\text{ст}} (T) \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial z}.$$

Расчетные исследования теплового состояния стенки резонатора проведены для ожидаемых режимов, которые соответствуют испытаниям стендового образца ГСВ, работающей на топливной композиции воздух + этанол. При этом суммарный расход \dot{m} топливной смеси составил 150 г/с при среднем давлении газа в камере ГВП $p_T = 2,5$ МПа.

В качестве материалов резонатора рассмотрены сталь 12X18H10T, хром-никелевый сплав ХН60ВТ и жаростойкая бронза БрХ08, а в качестве охлаждающей жидкости — вода и этанол. Для импульсного режима работы ГСВ были приняты следующие значения параметров: частота включений $f = 1$ Гц; коэффициент заполнения импульсного режима $k_3 = 0,5$. Расчетная сетка для резонатора представлена на рис. 3. При этом шаг по времени $\Delta\tau = 0,1$ мс, а шаги по радиусу и длине резонатора $\Delta r = \Delta z = 0,2$ мм.

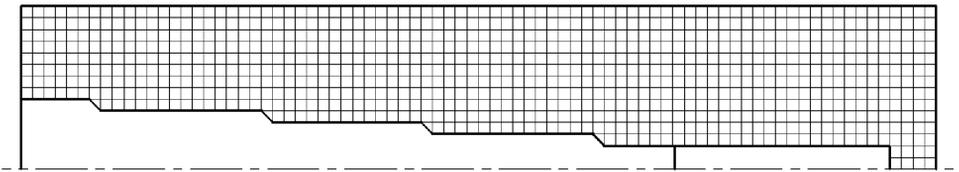


Рис. 3. Расчетная сетка резонатора

Представленная адаптированная математическая модель позволяет проводить расчеты как вынесенного резонатора, так и резонатора с внешним проточным охлаждением.

Тепловое состояние резонатора с радиационно-конвективным охлаждением. Численное исследование теплового состояния вынесенного резонатора с радиационно-конвективным охлаждением проведено для ГСВ, работающей на топливе воздух + этанол, при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 1$. В результате исследования получены поля температур в процессе работы ГСВ. Для примера приведены картины распределения температур в стенке резонатора из

стали 12Х18Н10Т, сплава ХН60ВТ и бронзы БрХ08 при работе ГСВ на непрерывном (рис. 4) и импульсном (рис. 5) режимах в момент начала разрушения резонатора.

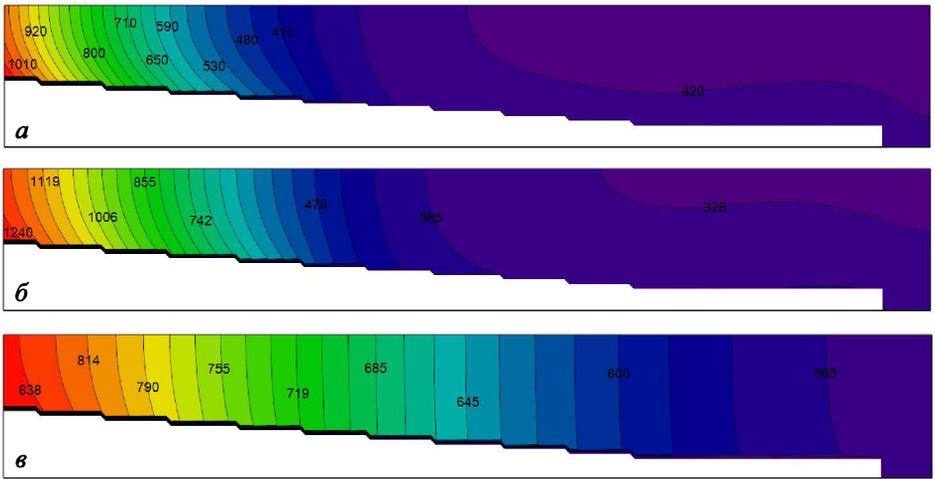


Рис. 4. Поля температур, К, в резонаторе из стали 12Х18Н10Т (а), сплава ХН60ВТ (б) и бронзы БрХ08 (в) при непрерывном режиме работы ГСВ

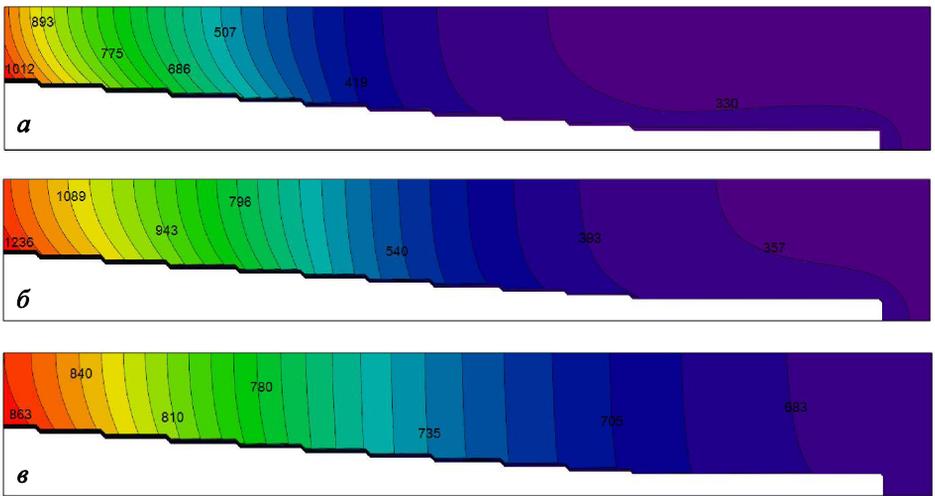


Рис. 5. Поля температур, К, в резонаторе из стали 12Х18Н10Т (а), сплава ХН60ВТ (б) и бронзы БрХ08 (в) при импульсном режиме работы ГСВ

Характер распределения температуры в стенке резонатора указывает на то, что его разрушение (для всех рассмотренных материалов резонатора и режимов работы ГСВ) может начаться вблизи входной кромки.

Анализ нестационарных полей температуры позволил определить $t_{р.непр}$ и $t_{р.имп}$ — время работы ГСВ до начала разрушения резонатора соответственно при непрерывном и импульсном режиме для различных материалов резонатора (таблица).

Время работы ГСВ до начала разрушения резонатора, с

Материал резонатора	$t_{р,непр}$	$t_{р,имп}$
Сталь 12Х18Н10Т	3,1	7,5
Сплав ХН60ВТ	7,6	23,5
Бронза БрХ08	5,8	13,3

Максимальное время работы ГСВ, определяемое временем до разрушения резонатора, получено в случае использования сплава ХН60ВТ и составляет 7,6 с при непрерывном режиме и 23,5 с при импульсном режиме. Отсюда следует, что с точки зрения получения максимального ресурса работы целесообразно использовать резонатор из сплава ХН60ВТ.

Следует отметить, что расположение резонатора снаружи увеличило время работы ГСВ в 1,2...2,4 раза относительно времени работы резонатора, целиком установленного в проточном тракте ГСВ [8].

Тепловое состояние резонатора с внешним проточным охлаждением водой. Численное исследование теплового состояния резонатора с внешним проточным охлаждением водой проводили для непрерывной работы ГСВ на топливе воздух + этанол при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 1$. В ходе исследования определено, что при проточном охлаждении водой разрушения резонатора ГСВ не происходит и в стенке реализуется стационарный тепловой режим. Значения максимальных температур $T_{ст,маx}$ в стенке резонатора в зависимости от расхода воды \dot{m}_B в тракт охлаждения приведены на рис. 6.

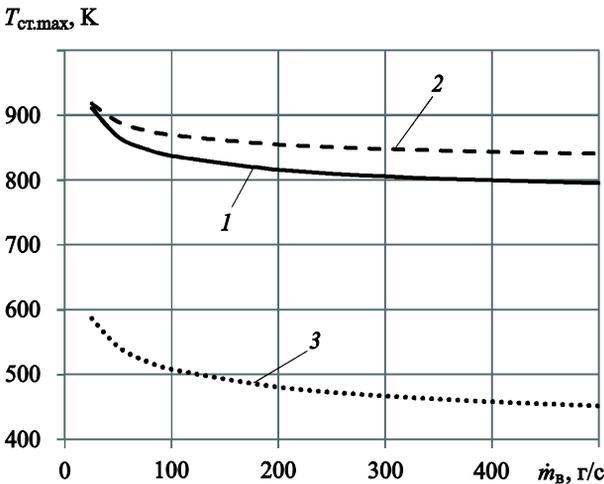


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры в стенке резонатора от расхода воды:
 1 — сталь 12Х18Н10Т; 2 — сплав ХН60ВТ; 3 — бронза БрХ08

Минимальные температуры стенки получены для резонатора из бронзы БрХ08, максимальные — из сплава ХН60ВТ. Следует отметить существенную зависимость максимальной температуры стенки резонатора от расхода воды.

Таким образом, увеличение расхода воды в тракт охлаждения с 25 до 100 г/с приводит к снижению максимальной температуры стенки для резонатора из стали 12Х18Н10Т на 70 К, из сплава ХН60ВТ на 50 К, из бронзы БрХ08 на 80 К. При дальнейшем увеличении расхода воды в тракт охлаждения максимальная температура стенки резонатора снижается на 20...30 К.

При расходе воды $\dot{m}_g = 25$ г/с время выхода на стационарный тепловой режим для резонатора из стали 12Х18Н10Т составляет 6,2 с, для сплава ХН60ВТ — 5,2 с, для бронзы БрХ08 — 7,7 с. При повышении расхода воды до $\dot{m}_g = 500$ г/с время выхода на стационарный тепловой режим сокращается в 3–4 раза.

Определенный интерес представляет не только максимальная температура стенки резонатора, но и характер температурного поля в ней при проточном охлаждении наружной поверхности стенки резонатора. Для получения представления о температурных полях в стенке резонатора при его стационарном тепловом состоянии на рис. 7 приведены картины распределения температур в стенке резонатора при работе ГСВ на непрерывном режиме.

Для всех рассматриваемых материалов во всем диапазоне значений \dot{m}_g наиболее горячей является стенка резонатора в области входной кромки. Для резонатора с проточным охлаждением водой из стали 12Х18Н10Т и сплава ХН60ВТ, как и для неохлаждаемого резонатора, характерен неравномерный прогрев стенки в осевом направлении. Резонатор из бронзы БрХ08 имеет более равномерный прогрев.

Дополнительно были проведены расчеты и для схемы проточного охлаждения с подводом охладителя со стороны правого торца резонатора, т. е. в зону с наименьшей температурой стенки. При этом полученные значения максимальной температуры в стенке резонатора для сталей были больше на 0,5...1,0 К, а для бронзы — на 2...3 К, чем при подводе охладителя в зону с наибольшей температурой стенки. Отсюда можно сделать вывод, что направление движения воды в тракте охлаждения не влияет на тепловое состояние резонатора и может быть выбрано только из конструктивных соображений.

Для ГСВ с внешним проточным охлаждением резонатора водой допустимо использовать все рассмотренные материалы. Рекомендуется выбирать расход воды в тракт охлаждения в диапазоне значений 25...100 г/с в связи с тем, что при таких расходах температурное состояние резонатора является допустимым и дальнейшее увеличение расхода воды не приводит в ощутимому снижению температуры стенки.

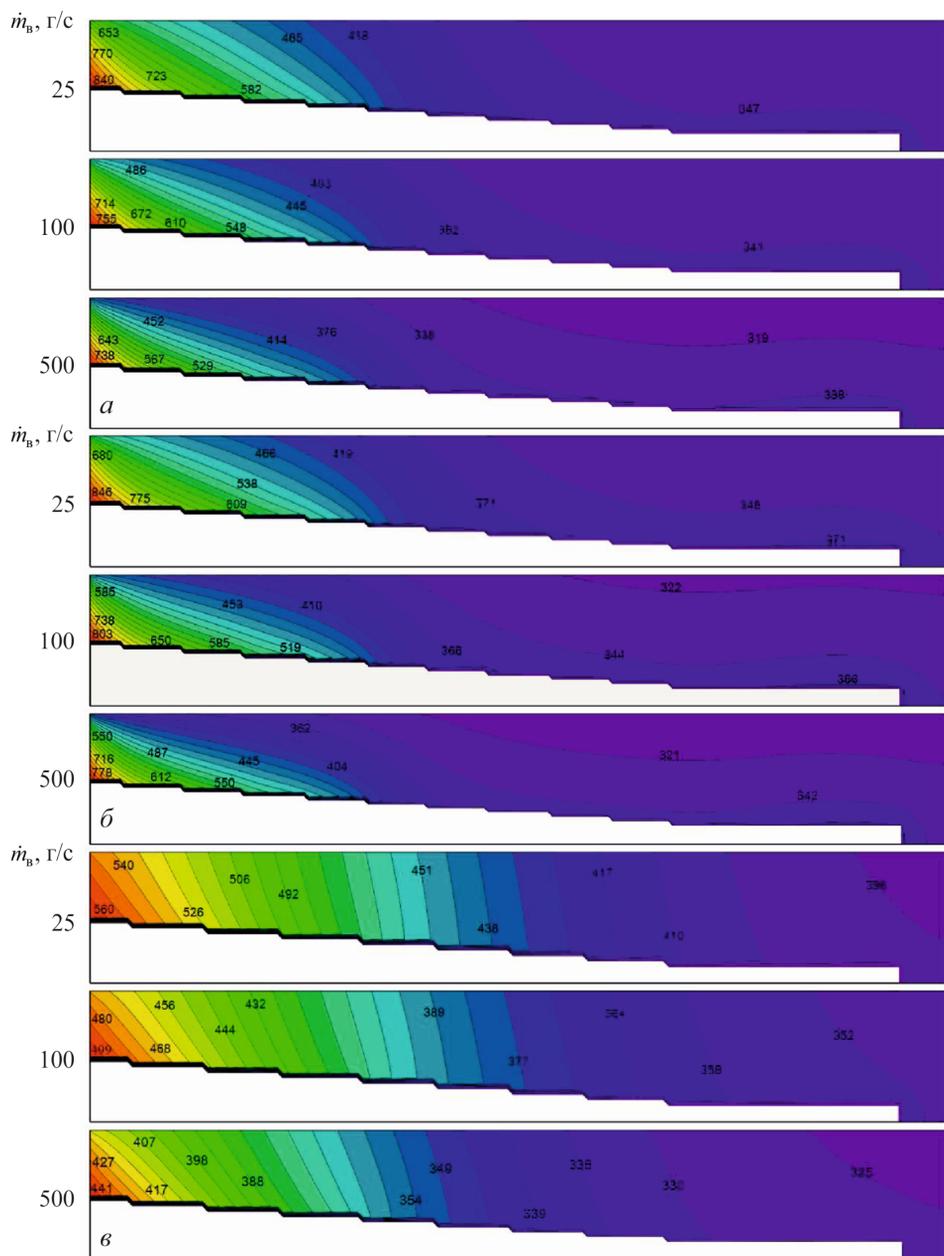


Рис. 7. Поля температур, К, в резонаторах из различных материалов при непрерывном режиме работы ГСВ и различных расходах охладителя:
a — сталь 12X18H10G; *б* — сплав XH60BT; *в* — бронза BrX08

Тепловое состояние резонатора с внешним проточным охлаждением этанолом. В результате численного исследования теплового состояния резонатора с внешним проточным охлаждением с помощью компонента топлива (этанола) получены поля температур в процессе непрерывной работы ГСВ для различных коэффициентов

избытка окислителя $\alpha = 0,2 \dots 2,0$. При этом в рубашку охлаждения поступал весь расход горючего. Определено, что при использовании этанола в качестве охлаждающей жидкости разрушения резонатора ГСВ также не происходит и в стенке реализуется стационарный тепловой режим. Значения максимальных температур в стенке резонатора для различных коэффициентов избытка окислителя приведены на рис. 8, а подогрев в рубашке охлаждения — на рис. 9.

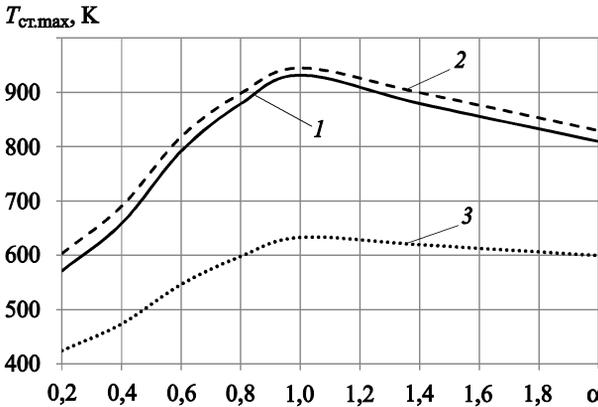


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры в стенке резонатора от коэффициента избытка окислителя: 1 — сталь 12X18H10T; 2 — сплав ХН60ВТ; 3 — бронза БрХ08

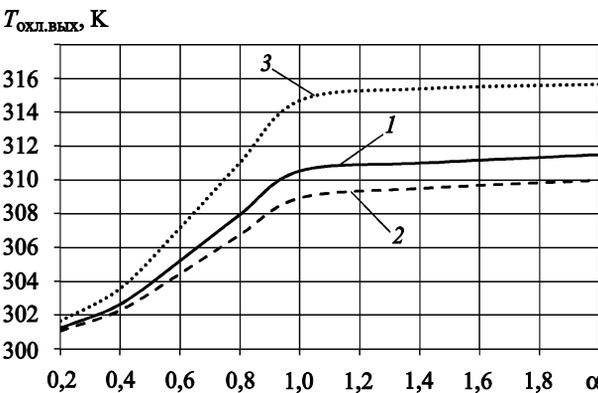


Рис. 9. Зависимость температуры этанола на выходе из тракта охлаждения от коэффициента избытка окислителя: 1 — сталь 12X18H10T; 2 — сплав ХН60ВТ; 3 — бронза БрХ08

Следует отметить, что для резонатора характерно увеличение подогрева этанола при увеличении коэффициента избытка окислителя. Причем с повышением значения α от 1 до 2 подогрев этанола меняется мало, и можно принять его на этом участке постоянным и равным среднему значению.

Расчеты показывают, что для рассматриваемых режимов время выхода на стационарный тепловой режим составляет 4...12 с и зависит от материала стенки и режима работы ГСВ.

На рис. 10 приведены примеры распределения температур в стенке резонатора из различных материалов при работе ГСВ на непрерывном режиме для коэффициентов избытка окислителя $\alpha = 0,2; 1,0$ и $2,0$.

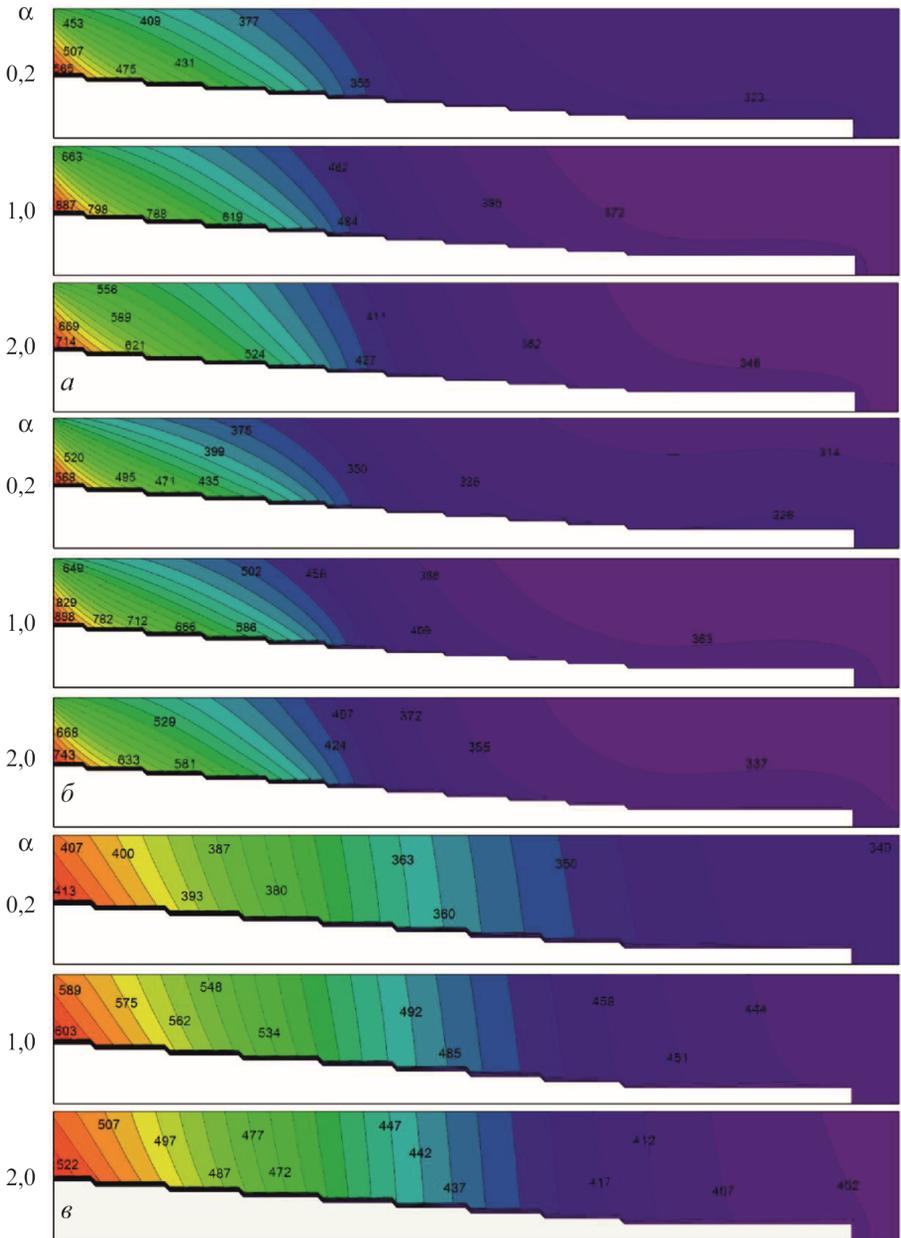


Рис. 10. Поля температур, К, в резонаторах из различных материалов при непрерывном режиме работы ГСВ для различных значений коэффициентов избытка окислителя: 1 — сталь 12Х18Н10Т; 2 — сплав ХН60ВТ; 3 — бронза БрХ08

Минимальные значения температур в стенке получены для резонатора из бронзы БрХ08, максимальные – из сплава ХН60ВТ. Зависимость максимальной температуры в стенке резонатора имеет экстремум (см. рис. 8).

Для всех рассматриваемых материалов стенки резонатора во всем диапазоне значений коэффициента избытка окислителя $\alpha = 0,2 \dots 2,0$ наибольшая температура в стенке соответствует $\alpha = 1$ (см. рис. 10), при котором реализуется максимальная температура продуктов сгорания и, как следствие, наибольшие конвективные и радиационные тепловые потоки.

Выводы. При использовании неохлаждаемого резонатора из всех рассмотренных материалов конструкции наиболее целесообразно применять сплав ХН60ВТ. В этом случае максимальное время работы ГСВ может составлять до 7,6 с при непрерывном и до 23,5 с при импульсном режимах работы.

При проточном охлаждении водой или регенеративном охлаждении этанолом разрушения резонатора ГСВ не происходит и в стенке реализуется стационарный тепловой режим, наступающий в течение 4...12 с. Для ГСВ с регенеративным охлаждением этанолом максимальная температура в стенке резонатора из стали 12Х18Н10Т не превышает 935 К, для сплава ХН60ВТ — 945 К, а из бронзы БрХ08 — 635 К. Максимальные температуры стенки достигаются при соотношении компонентов в ГСВ, близком к стехиометрическому.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 14-08-01118.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Антонов А.Н., Купцов В.М., Комаров В.В. *Пульсации давления при струйных и отрывных течениях*. Москва, Машиностроение, 1990, 272 с.
- [2] Арефьев К.Ю., Воронежский А.В., Ильченко М.А. Исследование динамических характеристик резонансной газодинамической системы воспламенения топливной смеси. *Физика горения и взрыва*, 2013, № 6, с. 41–46.
- [3] Шпак В.С., Шаповалов О.И., Габитов Д.М., Карташов Ю.И., Сердюк В.В., Ашеинази Л.А. Этанольные топлива в России. *Химия и бизнес*, 2004, № 3, с. 32–35.
- [4] Шпак В.С., Шаповалов О.И., Карташов Ю.И., Румянцев В.Н., Сердюк В.В., Ашеинази Л.А. Топливный этанол и экология. *Химическая промышленность*, 2006, т. 83, № 2, с. 89–96.
- [5] Wang M. *Ethanol, the complete energy life cycle picture*. Argonne National Laboratory's Center for Transportation Research. 2nd ed. 2007. URL: https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/ethanol_brochure_color.pdf (дата обращения 10.11.2016).
- [6] Воронежский А.В., Арефьев К.Ю., Захаров В.С. Расчетно-теоретическое исследование резонансной системы газодинамического воспламенения ЖРД малой тяги. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 1, с. 31–41.

- [7] Воронцовский А.В., Полянский А.Р., Арефьев К.Ю. Численный анализ неконсервативных акустических систем применительно к устройствам инициации рабочего процесса в генераторах высокоэнтропийных потоков. *Наука и образование*, 2012, № 2. URL: <http://www.technomag.edu.ru/doc/339499.html> (дата обращения 09.10.2016).
- [8] Ворожеева О.А., Арефьев К.Ю. Расчетные исследования теплового состояния резонатора газодинамической системы воспламенения на двухфазной топливной композиции. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 5, с. 91–100.
- [9] Добровольский М.В. *Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования*. 3-е изд. Ягодников Д.А., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 488 с.
- [10] Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. Москва, Энергия, 1977, 344 с.

Статья поступила в редакцию 07.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ворожеева О.А., Арефьев К.Ю. Исследование эффективности охлаждения резонатора газодинамической системы воспламенения на двухфазной топливной композиции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1567>

Ворожеева Олеся Андреевна родилась в 1988 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Ассистент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области математического моделирования и расчетно-экспериментального исследования рабочих процессов и теплового состояния элементов конструкции ЖРД и РДМТ. e-mail: oa-vorozheeva@mail.ru

Арефьев Константин Юрьевич родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ. Область научных интересов: моделирование иницирования и протекания рабочего процесса в энергетических и силовых установках перспективных аэрокосмических систем. e-mail: arefyev@rambler.ru

Research into efficiency of resonator cooling in gas-dynamic ignition system with two-phase fuel composition

© O.A. Vorozheeva, K.Yu. Arefyev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Nowadays, life-extension of gas-dynamic ignition systems (GDIS) is of great interest. GDIS are used in the present-day energy, propulsion and technological installations of different purpose. It can be achieved by reducing heat impact on the main element of GDIS, i.e. resonator. To solve this problem, systems with either a remote resonator or direct-flow cooling of its outer surface are applied. The paper considers a thermal state of both resonators: the remote resonator and the one with direct-flow cooling. Firing time of GDIS is estimated until the remote resonator starts breaking, with the system operating uninterrupted and momentum. Direct-flow cooling efficiency of the resonator is analyzed. Selection guidelines of the structural layout and resonator material are given.

Keywords: thermal state, gas-dynamic ignition system, two-phase fuel composition, mathematical modeling, ethanol, resonator, cooling

REFERENCES

- [1] Antonov A.N., Kuptsov V.M., Komarov V.V. *Pulsatsii davleniya pri struynykh i otrynykh techeniyakh* [Ripple pressure in inkjet and separated flows]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 272 p.
- [2] Arefyev K.Yu., Voronetsky A.V., Ilchenko M.A. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2013, no. 6, pp. 41–46.
- [3] Shpak V.S., Shapovalov O.I., Gabitov D.M., Kartashov Yu.I., Serdyuk V.V., Asheinazi L.A. *Khimiya i biznes — Chemistry and Business*, 2004, no. 3, pp. 32–35.
- [4] Shpak V.S., Shapovalov O.I., Kartashov Yu.I., Rumyantsev V.N., Serdyuk V.V., Asheinazi L.A. *Khimicheskaya promyshlennost — Industry & Chemistry*, 2006, vol. 83, no. 2, pp. 89–96.
- [5] Wang M. *Ethanol, the complete energy life cycle picture*. Argonne National Laboratory's Center for Transportation Research, 2007. Available at: https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/ethanol_brochure_color.pdf (accessed November 11, 2016).
- [6] Voronetsky A.V., Arefyev K.Yu., Zakharov V.S. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 1, pp. 31–41.
- [7] Voronetsky A.V., Polyansky A.R., Arefyev K.Yu. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 2. Available at: <http://www.technomag.edu.ru/doc/339499.html> (accessed October 10, 2016).
- [8] Vorozheeva O.A., Arefyev K.Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 5, pp. 91–100.
- [9] Dobrowolski M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli. Osnovy proektirovaniya* [Liquid propellant rocket engines. Basics of design]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 488 p.

- [10] Mikheev M.A., Mikheev I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of Heat Transfer]. Moscow, Energia Publ., 1977, 344 p.

Vorozheeva O.A. (b. 1988) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2012. Lecture Assist., Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 research works in the field of mathematical modeling, computational and experimental study of operating processes and thermal state of structural elements LRE and RDMT. e-mail: oa-vorozheeva@mail.ru

Arefyev K.Yu. (b. 1988) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2011. Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 research works. Research interests include initiation and operating process modeling in the energy and power units of advanced aerospace systems. e-mail: arefyev@rambler.ru