

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТЕНКИ КАНАЛА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА

Сергей Игоревич Киктев, аспирант кафедры 203, Россия, Москва, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)" (МАИ)

В работе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований по изучению влияния деформированной поверхности канала на структуру течения высокоскоростного газового потока при горении. Проведена верификация ранее выполненных теоретических исследований по оценке воздействия деформации стенки канала на структуру течения.

The paper presents the results of experimental studies on the effect of a deformed channel surface on the structure of the flow of a high-velocity gas stream during combustion. Verification of numerical and theoretical studies to evaluate the effect of deformation of the channel wall on the flow structure was carried out.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, модельная камера сгорания, распределение давлений.

Key words: supersonic flow, model combustion chamber, pressure distribution, flow structure.

Исследования течения высокоскоростных потоков в каналах различной конфигурации проводились с 50-х годов XX века [1]. Исследовались течения как при отсутствии, так и при наличии горения. При этом большинство работ не учитывало такой важный аспект как деформация стенок канала при высокоскоростном высокотемпературном течении. В основном это связано с коротким временем работы модельной установки при проведении "горячих" запусков, а также толщиной стенки исследуемой модели [2,3].

Основой для проведения экспериментальных исследований по оценке влияния деформированной стенки канала на структуру течения высокоскоростного газового потока послужили выводы численно-теоретических исследований. При этом были сделаны следующие предположения:

- Волнообразная поверхность отсечного клина оказывает значительное влияние на структуру течения потока в канале. При одинаковых граничных условиях на входе в расчётную модель в отсечных клиньях с плоской и деформированной поверхностями устанавливалось различное давление.

- В отсечных клиньях с деформированной поверхностью происходит смещение зон повышения давления вдоль поверхности клина.

- Изменение структуры течения газового потока вдоль деформированной поверхности может привести к опасному снижению коэффициента запаса прочности канала.

В ходе выполнения работы были спроектированы и разработаны модели отсечных клиньев из стали, представленные на рис. 1:

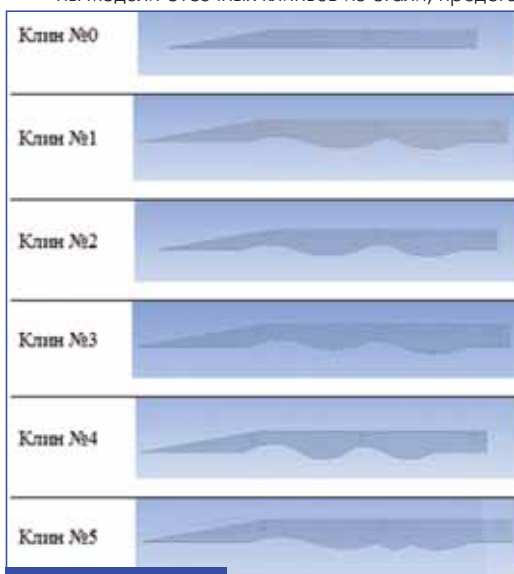


Рис. 1 Отсечные клинья

Во время экспериментов на установку устанавливались не только модели с волнообразным профилем (клинья №№1-5), но отсечной клин с ровной поверхностью (клин №0). Сравнение параметров между двумя видами моделей показывает, насколько изменяются параметры газового потока.

Работа проведена на "Стенде сверхзвукового горения" ИТПМ СО РАН (рис. 2). Главные элементы установки: электродуговой подогреватель (ЭДП) мощностью 2 МВт с системой электропитания и управления ЭДП (в данной работе не применялся); форкамера; сопловой блок; выхлопная система с эжектором и шахтой шумоглушения; воздушная и топлив-

ная системы подачи сред (средства регулирования и измерения расходов); система автоматического сбора и обработки данных. Структура течения регистрировалась с применением теневой схемы на основе прибора ИАБ-451, для изучения процесса горения применялась спектрозональная съемка в УФ диапазоне, на длине волны излучения радикала ОН.

Схема камеры сгорания с отсечным клином №0 (отсечной клин с ровной поверхностью) представлена на рис. 3. В точках 1...9 измерялось статическое давление на верхней исследуемой стенке канала (распределение давления по длине P_1-P_9). На входе в камеру сгорания регистрировалось статическое давление $P_{ст}$. В точке 10 - давление за уступом $P_{д}$. В 11-ой точке - давление P_0 на внутренней поверхности камеры сгорания. Величины полного давления определялись в точках 12...14.

Уступ в модельной камере сгорания был спроектирован с целью изучения и организации эффективного процесса горения в высокоскоростном потоке в деформированной модельной камере сгорания.

При проведении испытаний основной целью было изучение влияния искривления верхней поверхности канала на структуру течения при горении за уступом. В качестве топлива использовался водород, подаваемый в малых количествах за уступ. На входе в модельную камеру сгорания создавался поток, соответствующий $M = 1.9$, при этом давление в форкамере принималось за полное давление в потоке ($P^*=P_0$), затем определялось число Маха на входе в модельную камеру сгорания:

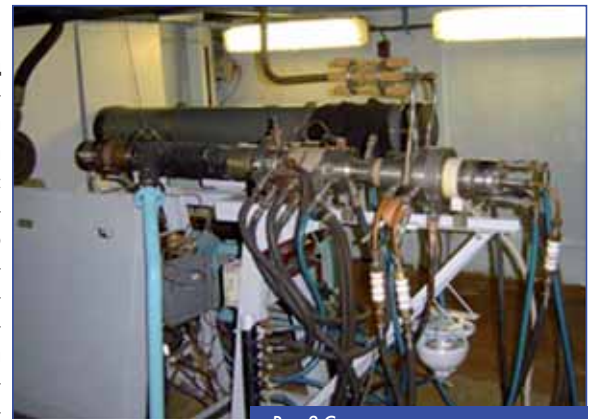


Рис. 2 Стенд сверхзвукового горения

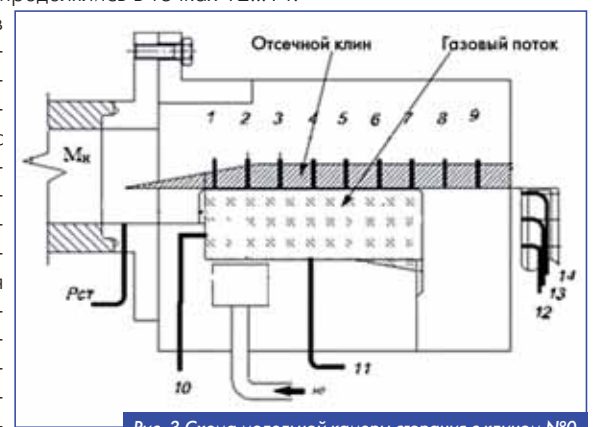


Рис. 3 Схема модельной камеры сгорания с клином №0

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P}{P_{ст}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (1)$$

Во время проведения экспериментов были исследованы 5 отсечных клинцев. Параметры экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

На рис. 4 представлены результаты проведения экспериментов отсечного клина №0. На рис. 4а наблюдается система косых скачков уплотнения, спровоцированных кромкой уступа. При по-

№ эксперимента	Условное обозначение отсечного клина	Относительный расход водорода, $\bar{G} = G/G_1$
1	Клин №0	1
2	Клин №1	0,88
3	Клин №2	1,02
4	Клин №3	1,02
5	Клин №4	1,02
6	Клин №5	1,02
7	Клин №5 - доп. эксперимент	2,71

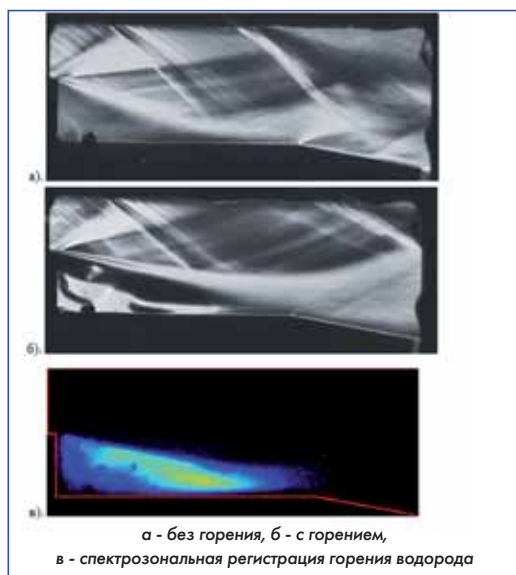


Рис. 4 Структура течения в модельной камере сгорания при испытаниях отсечного клина №5

даче водорода за уступ камеры и его горения происходит некоторая перестройка скачков уплотнения (рис. 4б). В частности, второй косой скачок, исходящий от поверхности клина, сдвигается вправо, т.е. вдоль по потоку.

Качество горения водорода видно на рис. 4в. Относительная длина клина приведена в калибрах: $\bar{X} = X/l_{\text{клина}}$, где за характерный размер выбрана длина клина.

Была проведена верификация расчётных моделей. На рис. 5 представлен график

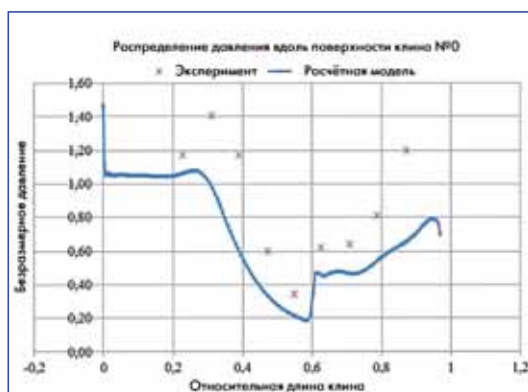


Рис. 5 Относительное давление вдоль стенки отсечного клина №0

в зоне отрыва за уступом. На теневых картинах наблюдается всяческий скачок. При горении отрывная зона за уступом увеличивается,

и точка присоединения смещается в область расширения канала.

Была проведена верификация расчётных моделей. На рис. 7 представлен график распределения давления вдоль поверхности клина №5.

В дополнительном эксперименте для отсечного клина №5 были проведены опыты с изменением расхода водорода. Относительный расход водорода составил $\bar{G}_{H_2} = 1,02 \dots 2,71$.

Анализируя картины спектрозональной регистрации горения водорода, можно сделать выводы о том, что увеличение расхода водорода приводит к расширению области горения, при этом при малом расходе все сгорает в отрывной зоне за уступом, а с увеличением расхода область горения распространяется по потоку.

На основании проведенных экспериментальных работ можно сделать следующие выводы:

- Подтверждено, что организация горения повышает давление и увеличивает зону отрыва потока;
- Конфигурация поверхности канала существенно влияет на процесс горения в зоне отрыва за уступом.
- Наблюдается хорошее качественное совпадение результатов численных и экспериментальных исследований.

Литература

1. В.А. Сабельников, В.И. Пензин. К истории исследований в области высокоскоростных ПВРД в России. М.: Изд. ЦАГИ, 2008. - 64 с.
2. В.И. Пензин Экспериментальное исследование отрывных течений в каналах/ М.: Изд. ЦАГИ, 2009 г. - 207 с.
3. В.И. Звегинцев Газодинамические установки кратковременного действия. Часть 1. Установки для научных исследований. - Новосибирск: Параллель, 214. - 551 с.
4. Г.Н. Абрамович Прикладная газовая динамика, ч.1 - М.: Наука, 1976г.
5. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Шамраева М.А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. - М.: Либроком, 2015. - 270 с.

Связь с автором: kiktev_si@mail.ru

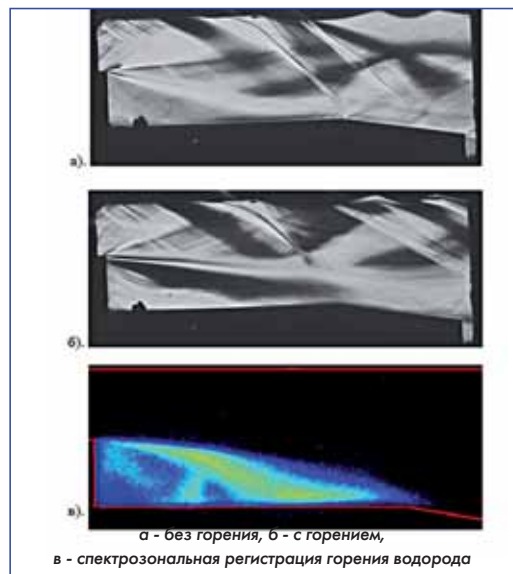


Рис. 6 Структура течения в модельной камере сгорания при испытаниях отсечного клина №5

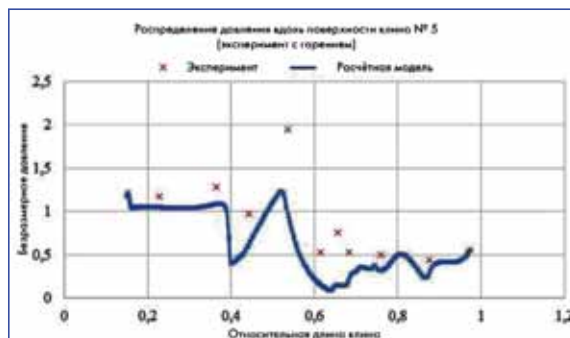


Рис. 7 Относительное давление вдоль стенки отсечного клина №5