

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ПОВОРОТОМ ПОТОКА В ГАЗОСБОРНИКЕ

© 2006 Г. П. Гребенюк¹, С. Ю. Кузнецов², В. Ф. Харитонов²

¹ФГУП «НПП «Мотор», г. Уфа

²Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассматриваются результаты численного моделирования с помощью программного комплекса ANSYS газодинамических процессов в зоне разбавления и газосборнике камеры сгорания с радиальным расположением жаровых труб. Исследуется влияние геометрических и режимных параметров (диаметра основных отверстий в жаровой трубе, угла вдува струи воздуха, отношения скоростных напоров струи и газа, угла поворота потока, кривизны канала газосборника) на максимальную неравномерность поля температур на выходе из камеры.

Одним из основных требований, предъявляемых к камере сгорания любого газотурбинного двигателя или газотурбинной установки, является обеспечение требуемого уровня неравномерности температурного поля на входе в турбину. Как известно, выходное поле температур количественно характеризуется параметрами максимальной окружной и радиальной неравномерности. Максимальная окружная неравномерность должна быть доведена до уровня, обеспечивающего ресурс сопловых и рабочих лопаток турбины. Радиальная неравномерность формируется исходя из требуемого распределения температуры газа по высоте рабочей лопатки турбины.

Получение приемлемого поля температур на выходе из камеры сгорания является одним из самых трудоемких этапов ее доводки. В связи с этим изучение особенностей формирования выходного температурного поля всегда остается актуальной задачей при разработке камер сгорания. Ее актуальность еще более возрастает применительно к камерам сгорания стационарных ГТУ, ресурсы которых в десятки раз превосходят ресурсы базовых авиационных двигателей.

В данной работе исследовалось влияние процессов, происходящих в зоне разбавления и газосборнике, на температурное поле в выходном сечении камеры сгорания при заданном на входе в зону разбавления распределении температур газа.

Объектом исследования служила камера сгорания модульного типа с радиальным

расположением отдельных модулей и общим газосборником, в котором газовый поток перед входом в турбину разворачивается на 90° [1]. В такой камере выходное поле температур определяется не только геометрией и газодинамическими процессами в зоне разбавления, но и сложным пространственным характером течения в поворотном газосборнике. В качестве инструмента исследования использовался программный комплекс конечно-элементного анализа ANSYS (модуль Flotran).

Для оценки корректности моделирования газодинамических процессов в зоне разбавления на первом этапе решались задачи моделирования распространения одиночной струи в поперечном потоке. Сравнение глубины проникновения струи, полученной при моделировании в ANSYS и при использовании известных моделей В. Я. Безменова, А. Лефевра, показало практическое совпадение результатов с отклонением 5-10 % [2]. Результаты газодинамического анализа течения также сопоставлялись с данными натурального эксперимента, приведенными в работе [3]. Сравнение показывает подобие профилей полного и статического давления в сечениях струи, расположенных по нормали к ее оси (рис. 1).

Анализ форм поперечных сечений струи на различном удалении от начального сечения показал, что под воздействием сходящегося потока происходит деформация поперечного сечения из круглого в подковообразное. При этом формы поперечных сечений

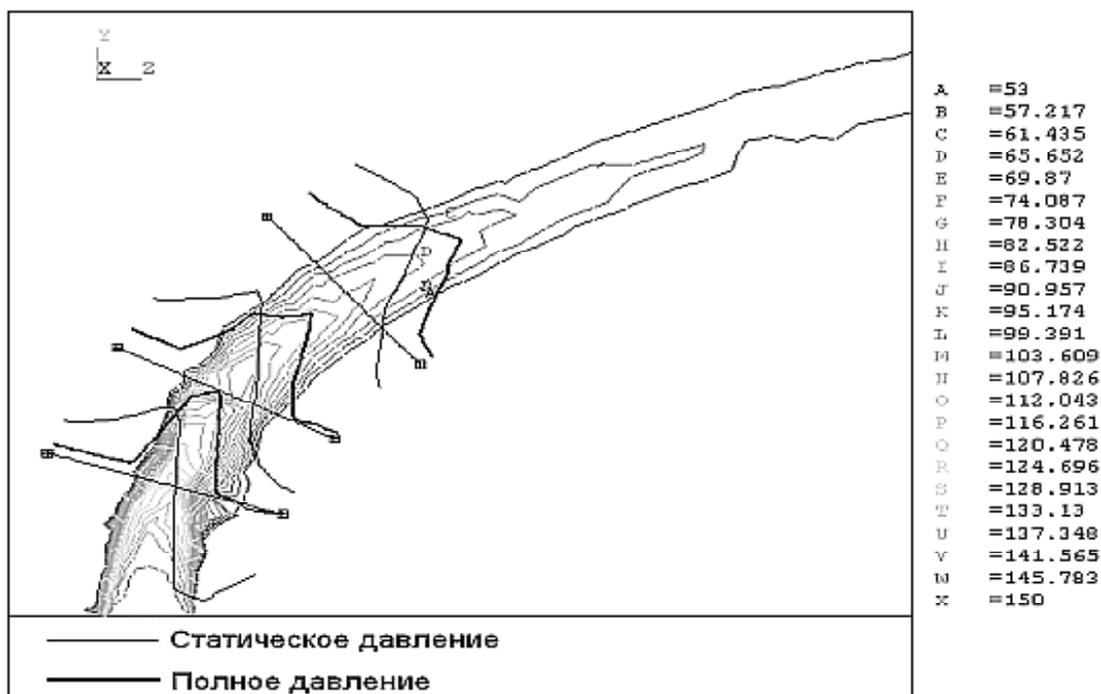


Рис. 1. Распределение абсолютных скоростей (изолинии), профили полного и статического давлений в плоскости симметрии одиночной струи

струи хорошо соотносятся с экспериментальными данными [3]. Положительные результаты численного моделирования в программном комплексе ANSYS картины распространения одиночной струи в поперечном потоке, в существенной степени влияющей на формирование температурного поля, позволили перейти к моделированию газодинамических процессов в элементах камеры сгорания - зоне разбавления и газосборнике.

На втором этапе проводилось параметрическое исследование влияния отдельных геометрических и режимных параметров на величину максимальной неравномерности температурного поля, определяемую как отношение разности максимальной и средне-массовой температур газа на выходе из камеры сгорания (или в рассматриваемом сечении) и разности средне-массовых температур газа на выходе и воздуха на входе.

Рассматривались следующие параметры:

- диаметр отверстий в поясе зоны разбавления,
- угол вдува струй вторичного воздуха,
- гидродинамический параметр q , равный отношению скоростных напоров в выходном сечении струи и в основном потоке,

- угол поворота потока в газосборнике,
- относительный радиус кривизны канала газосборника (отношение радиуса кривизны оси канала к высоте канала на выходе).

Расчетная геометрическая модель (рис. 2) для этого этапа состояла из участка жаровой трубы зоны разбавления, конфузора, цилиндрического участка и сектора кольцевого газосборника с угловым размером 36° .

Влияние диаметра d отверстий зоны разбавления на распределение температуры оценивалось по результатам моделирования для значений $d = 16; 20; 24; 28$ мм. Расход газа на входе в зону разбавления и расход воздуха через пояс отверстий сохранялись постоянными: $G_z = 1,3$ кг/с; $G_g = 0,3G_z$. Температура вторичного воздуха 573 К, максимальная температура газа на входе в зону разбавления 1500 К. В расчетах отслеживалось изменение температуры потока в промежуточном и выходном сечениях, а также определялась величина максимальной неравномерности температурного поля на выходе (рис. 3).

Так как расход воздуха через отверстия остается постоянным, то с увеличением их диаметра начальная скорость струи уменьша-

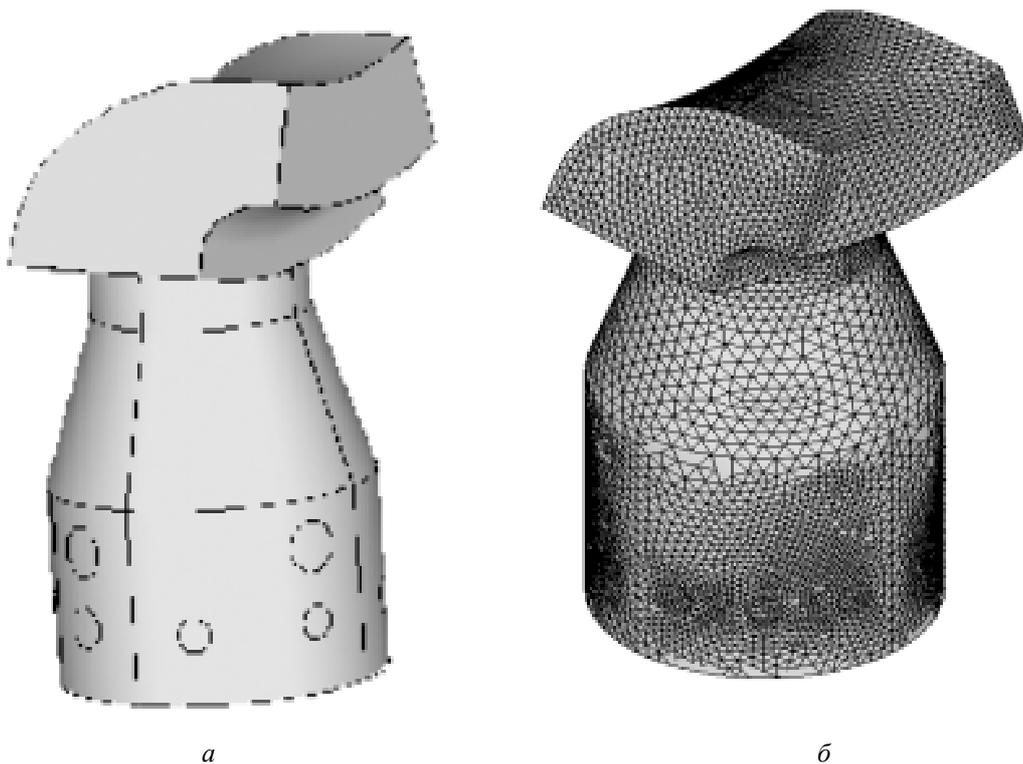


Рис. 2. Модель расчетной области: а – геометрическая, б - конечно-элементная

ется, соответственно уменьшается и глубина проникновения, что снижает интенсивность перемешивания струй с основным потоком и приводит к повышению неравномерности. При дальнейшем увеличении диаметра отверстий скорость в струях снижается настолько, что разбавляющий воздух не проникает в глубь жаровой трубы, а смешивается с пеленой охлаждающего воздуха на периферии. Как следствие, кривая изменения неравномерности становится более пологой (рис. 3).

Влияние угла вдува струй вторичного воздуха определялось при значениях $j = -60^\circ; -30^\circ; 0^\circ; 30^\circ; 60^\circ$. За начало отсчета ($j = 0^\circ$) принято направление вдува струи, нормальное к оси жаровой трубы. Знак «минус» означает, что продольные компоненты скорости в струе и в основном потоке имеют противоположное направление.

Моделирование течения, как и в предыдущем случае, осуществлялось при неизменной геометрии с фиксированным общим рас-

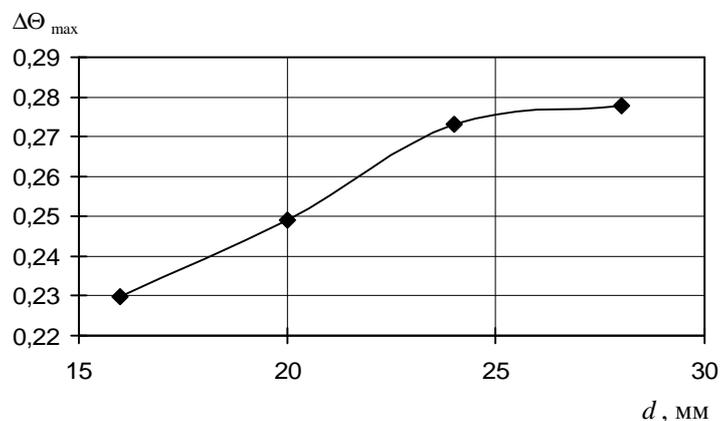


Рис. 3. Максимальная неравномерность DQ_{\max} температурного поля на выходе из камеры сгорания в зависимости от диаметра d отверстий зоны разбавления

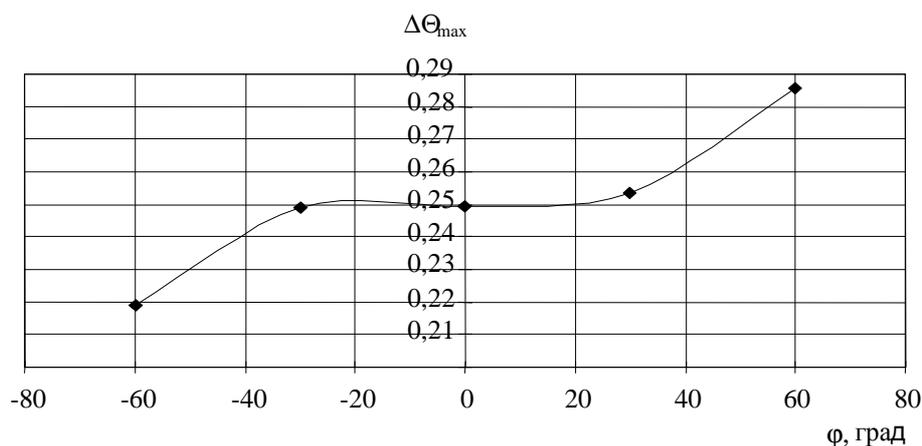


Рис. 4. Максимальная неравномерность DQ_{max} температурного поля на выходе при различных углах j вдува струй

ходом газа и расходом воздуха через пояс отверстий. Анализ распределения температур в поперечном сечении жаровой трубы перед входом в газосборник показал, что при угле -60° струи имеют наибольшую глубину проникновения. Основной поток при этом затрачивает энергию на разворот струй, в результате чего происходит лучшее перемешивание струй с основным потоком. Горячее ядро в этом случае имеет наименьшие размеры.

Наибольший перепад температур в выходном сечении наблюдается при подаче струй воздуха под углом $j = 60^\circ$. В этом случае струи прижимаются основным потоком к стенкам жаровой трубы, и интенсивность их смешения со сносящим потоком снижается. Максимальная неравномерность поля температур на выходе имеет наименьшее зна-

чение при $j = -60^\circ$ (рис. 4). В диапазоне значений угла $j = -30^\circ \dots +30^\circ$ не происходит ее заметного изменения. При дальнейшем увеличении угла максимальная неравномерность температурного поля возрастает.

Как известно, угол вдува струи в жаровую трубу зависит от величины и знака продольной составляющей скорости в отверстии, которая, в свою очередь, определяется скоростью и направлением течения воздуха в кольцевом канале. Результаты моделирования влияния угла вдува позволяют сделать вывод о том, что камеры модульного типа с противоточным течением в кольцевом канале имеют более благоприятные условия для снижения максимальной неравномерности поля температур за счет отрицательного угла вдува струи.

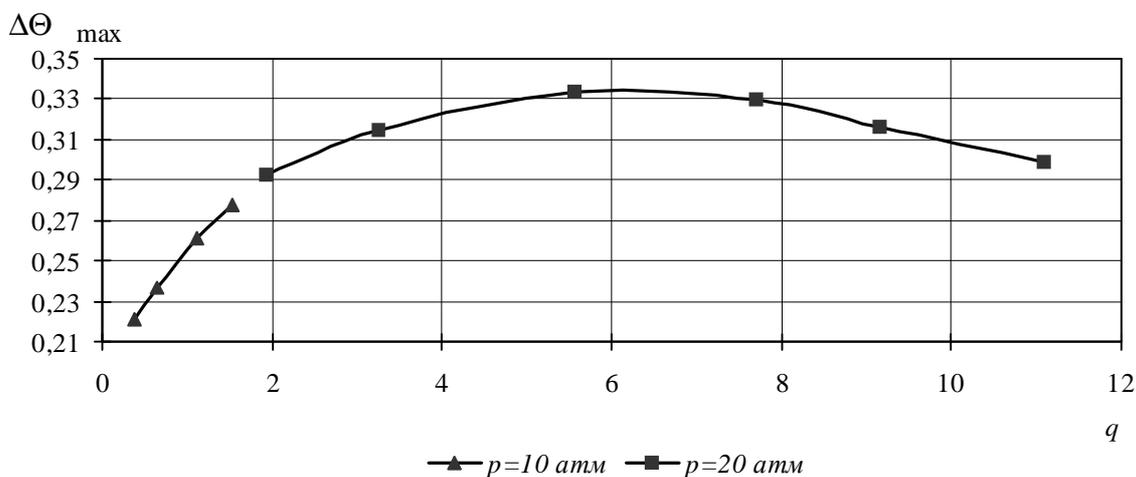


Рис. 5. Зависимость максимальной неравномерности DQ_{max} температурного поля на выходе от гидродинамического параметра q

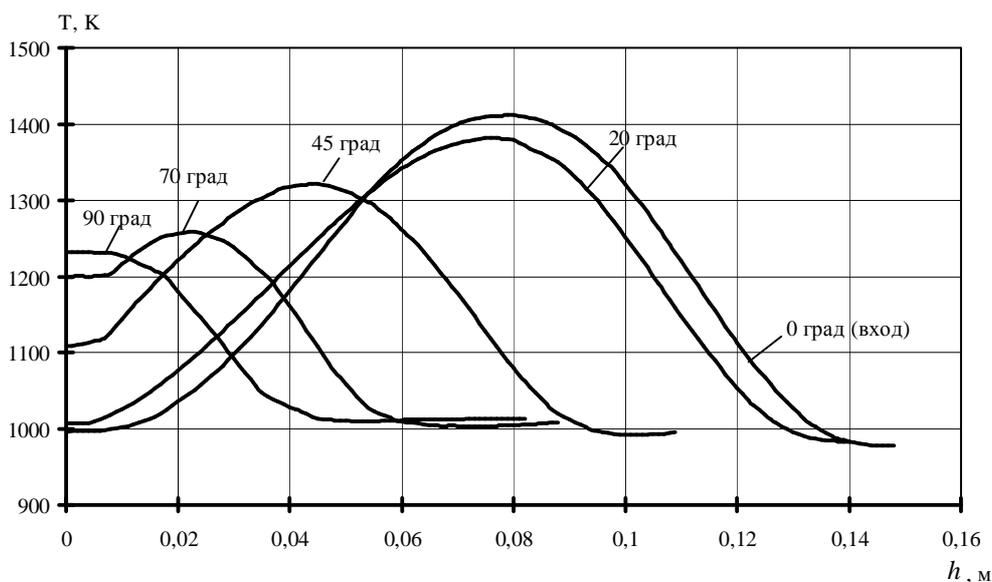


Рис. 6. Распределение температуры T потока по высоте h поперечного сечения проточной части для различных углов поворота потока в газосборнике

Одним из основных параметров, определяющих качество процесса перемешивания в зоне разбавления, является гидродинамический параметр q . Анализ его влияния на максимальную температурную неравномерность показал [4], что она изменяется немонотонно (рис. 5): сначала растет (так как глубина проникновения возрастает незначительно, наблюдается интенсивное смешение лишь у стенок жаровой трубы, ядро основного потока проходит в газосборник практически недеформированным), а затем при росте q выше 5...6 начинает уменьшаться вследствие перемешивания струй с основным потоком на всей глубине их проникновения.

Влияние угла поворота потока в газосборнике на выходное температурное поле отслеживалось по распределению температуры потока на входе в газосборник и после поворота потока на 20° , 45° , 70° и 90° (рис. 6). По мере поворота форма сечения проточной части претерпевает изменение от круга на входе до кольцевого сектора на выходе. Из рисунка видно, что с увеличением угла поворота потока существенно снижается максимальная температура газа (происходит разбавление горячего ядра потока вторичным воздухом) и происходит незначительный подогрев периферийных слоев потока. При этом более горячие слои потока перемещаются к внутренней поверхности.

Моделирование течения для трех значений относительного радиуса кривизны канала газосборника не выявило заметного различия в значениях максимальной неравномерности выходного поля температур (она изменялась от 0,235 до 0,249), что является, по-видимому, следствием узкого диапазона варьирования значений кривизны канала.

Проведенные модельные численные эксперименты позволяют выявить ряд новых закономерностей формирования выходного температурного поля газа и подтвердить ранее полученные данные по их влиянию на максимальную температурную неравномерность для противоточной камеры сгорания модульного типа. Полученные результаты могут использоваться при проектировании и доводке как камер сгорания ГТУ с радиальным или наклонным расположением жаровых труб, так и камер прямоточной схемы.

Список литературы

1. Кузнецов С. Ю., Харитонов В. Ф. Моделирование течения в жаровой трубе камеры сгорания модульного типа для энергетической ГТУ // Сборник трудов 2-й конференции пользователей CAD-FEM GmbH. – М., 17-18 апреля 2002, С. 65-70.
2. Кузнецов С. Ю., Харитонов В. Ф. Моделирование процессов в зоне разбавления камеры сгорания ГТД // Сборник докла-

дов Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Н. Д. Кузнецова, 21-22 июня 2001 г. – Самара, 2002, ч. 3, С. 98-104.

3. Гиршович Т. А. Турбулентные струи в поперечном потоке. - М.: Машиностроение,

1993.

4. Кузнецов С. Ю., Харитонов В. Ф., Гребенюк Г. П. Моделирование газодинамики процессов смешения в камерах сгорания ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2003. №2. - С. 39-42.