

# РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА В РАМКАХ ИССЛЕДОВАНИЯ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТУ

Кузнецов А.В., инженер, Булысова Л.А., ст.н.с.  
ОАО ВТИ, г. Москва, Россия

## Введение

В настоящее время в энергетике широкое распространение получили газотурбинные установки (ГТУ), в связи с чем, все большее внимание уделяется расчету и проектированию камер сгорания ГТУ (рис. 1). Камера сгорания ГТУ - это устройство, предназначенное для получения рабочего тела в виде газовой смеси заданных параметров (температура и давление), путем сжигания углеводородного топлива в потоке воздуха. Конструкция камеры сгорания включает в себя множество узлов и деталей, обеспечивающих рабочий процесс. Одним из наиболее ответственных элементов камеры сгорания является жаровая труба (рис. 2). Обеспечение необходимого температурного состояния жаровой трубы во многом будет определять ресурс камеры сгорания и всей ГТУ в целом.

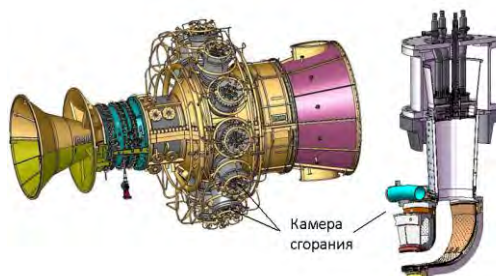


Рис. 1. Камера сгорания ГТУ.

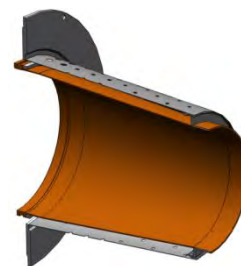


Рис. 2. Жаровая труба.

Стенки жаровых труб камер сгорания ГТУ при сжигании топлива подвергаются значительным тепловым нагрузкам и относятся к наиболее напряженным элементам ГТУ. Длительный срок службы и надежность жаровой трубы достигается рациональной конструкцией, обеспечивающей свободное тепловое расширение ее элементов, и эффективным охлаждением стенок до заданного температурного уровня. Основными критериями оценки эффективности охлаждения жаровой трубы являются:

- уровень максимальной температуры металла жаровой трубы;
- степень неравномерности температуры металла жаровой трубы.

## Постановка задачи и граничные условия

В рамках расчета малоэмиссионной камеры сгорания ГТЭ-45Р был проведен расчет теплового состояния жаровой трубы при помощи программного комплекса [FlowVision](#). На данной камере сгорания реализована конвективно-ударная система охлаждения: при помощи направляющей решетки, поток воздуха, подается на наружную поверхность жаровой трубы. Ударяясь о нее, струи воздуха разрушают пристенный слой и турбулизируют пристенную область, тем самым интенсифицируя теплообмен. В качестве рабочей области камеры сгорания была выбрана 1/6 всей камеры, без газосборного узла (рис. 3). Данная рабочая область состоит из двух подобластей: первая подобласть включает в себя область течения газов в камере сгорания и служит для расчета гидродинамики и горения, вторая подобласть включает в себя стенку жаровой трубы и служит для расчета теплообмена в ней.

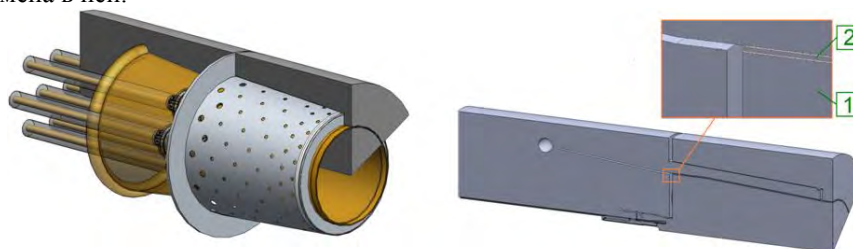


Рис. 3. Рабочая область камеры сгорания.

1 – Подобласть гидродинамики, 2 – Подобласть сопряженного теплообмена.

Для предложенной рабочей области были обозначены следующие граничные условия (рис. 4):

- Вход воздуха обозначен на торцевой стороне рабочей области, при этом его нормальная массовая скорость составляет  $3.4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ , а температура  $432^\circ\text{C}$
- Вход топлива обозначен на торце центральной части рабочей области, при этом его нормальная массовая скорость составляет  $45 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ , а температура  $20^\circ\text{C}$ .
- Выход продуктов сгорания обозначен также на торцевой стороне рабочей области, при этом тип границы определен как свободный выход.

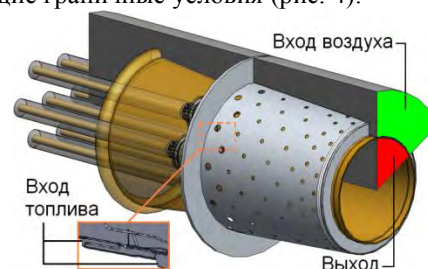
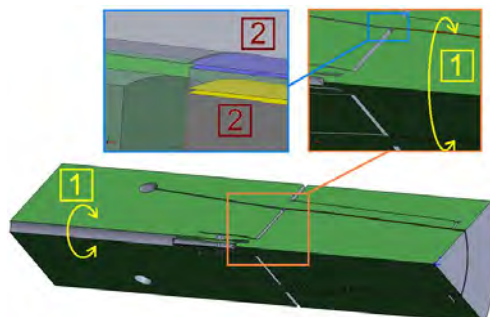


Рис. 4. Граничные условия.

Помимо граничных условий, для данной рабочей области были обозначены связки границ между собой (рис. 5). Первый тип связок был определен как периодический. Он служит для сопоставления параметров на заданной границе, т.к. рассчитывается только 1/6 часть всей модели. Данные связки задаются для обеих расчетных подобластей. Второй тип связок был определен как сопряжение. Он служит для сопоставления параметров на заданных границах при расчете сопряженного теплообмена, и, по сути, является связкой двух подобластей в рамках одной задачи. После определения граничных условий была сгенерирована расчетная сетка. Она была построена таким образом, чтобы разрешить отверстия направляющей решетки, а также область сопряженного теплообмена. При этом максимальный размер ячейки составил **16мм**, а общее число расчетных ячеек составило более **630000**.

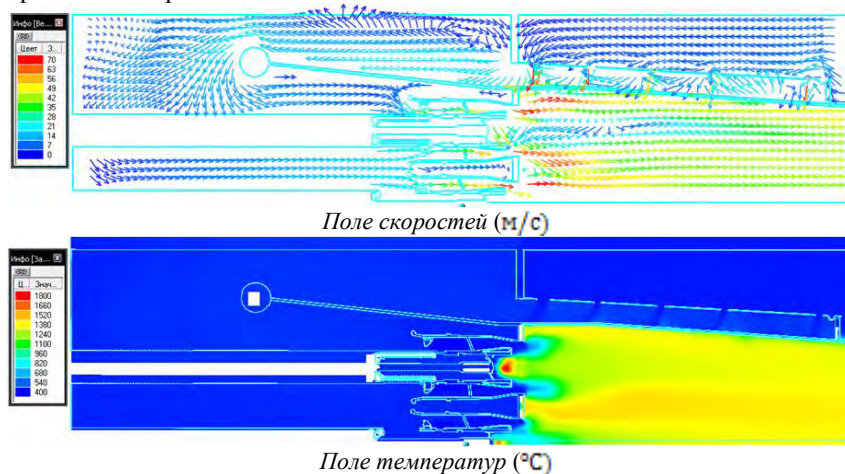


**Рис. 5. Связки границ.**

*1 – Периодическая связка, 2 – Сопряжение.*

## Результаты расчета

На первом этапе был произведен расчет горения, для определения поля скоростей и температур вдоль наружной и внутренней стороны жаровой трубы (рис. 6). При этом сопряженный теплообмен не рассчитывался в целях экономии расчетного времени.



**Рис. 6. Результаты расчета первого этапа.**

В результате данного расчета было получено поле скоростей с наружной стороны стенки жаровой трубы, проанализировав которое можно сделать вывод, что струи воздуха после направляющей решетки ударяются о стенку во всех пробивных сечениях камеры и не сносятся нарастающим потоком воздуха. Поле температур вдоль внутренней поверхности жаровой трубы оказалось достаточно равномерным: разброс температур не превышал **200°C**.

После расчета горения, был запущен расчет сопряженного теплообмена. Одним из результатов расчета была картина температурного поля внутри кольцевого канала системы охлаждения (рис. 7).

Как видно из результатов расчета, температура воздуха внутри кольцевого канала повышается примерно на **150..170°C**. Наибольшие температуры наблюдаются около выхода газов из камеры сгорания. Это объясняется низкими скоростями воздуха в этой области, что значительно ухудшает конвективный теплообмен в данной области. В результате расчета сопряженного теплообмена было получено распределение температур по толщине жаровой трубы (рис. 8)



**Рис. 7. Поле температур в кольцевом канале**

Как видно из полученных результатов, в жаровой трубе практически отсутствует градиент температур в радиальном направлении. Это объясняется малой толщиной жаровой трубы (**2.5мм**) и подтверждает общепринятое положение о том, что температуру внутренней и наружной поверхностей жаровой трубы в расчетах следует принимать одинаковыми. С другой стороны, наблюдается достаточно существенное и неравномерное распределение температур в осевом направлении. Этот факт напрямую связан с расположением отверстий на направляющей решетке и пробивной способностью ударных струй. Разброс температур стенки

жаровой трубы в области конвективно-ударного охлаждения невелик и составил около  $100^{\circ}\text{C}$ . Такая неравномерность вполне приемлема для многих современных материалов.

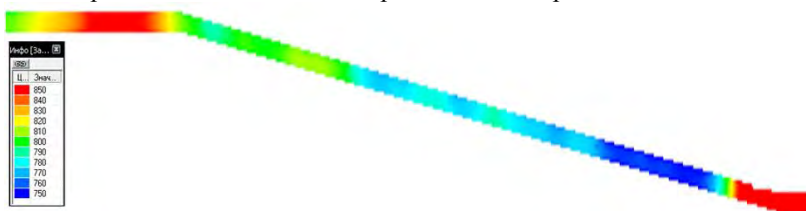


Рис. 8. Распределение температур по толщине жаровой трубы

Также в результате расчетов было получено распределение температур по наружной поверхности жаровой трубы (рис. 9). Это распределение является достаточно неравномерным, что говорит о нерациональном расположении отверстий направляющей решетки, хотя такая неравномерность приемлема для многих материалов. Повышенные температуры в центральной области жаровой трубы возникают из-за угасания пробивной способности струй в силу увеличения сносящего потока. При этом струи воздуха уже не разрушают пристенный слой и поэтому в данной области теплообмен носит в основном конвективный характер.

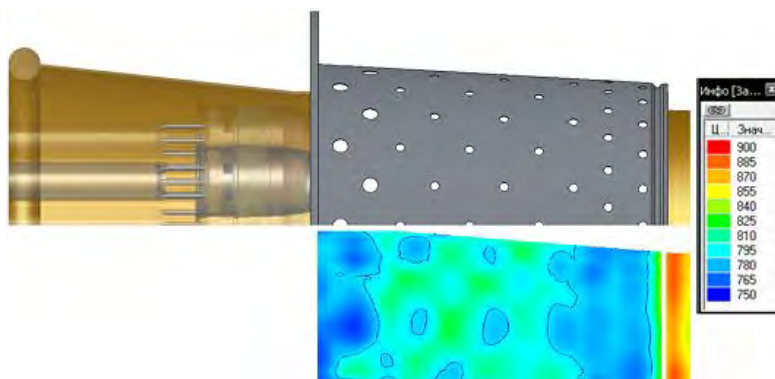


Рис. 9. Распределение температур по наружной поверхности жаровой трубы

## Заключение

Подводя итог всему вышесказанному, можно сделать вывод о том, что решение задач сопряженного теплообмена имеет большое значение для камер сгорания ГТУ, т.к. позволяет определять не только интегральные характеристики теплообмена в жаровой трубе, но и получать распределение температур по всей ее поверхности, что представляет большой практический интерес.