

УДК 66.045

Исследование теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла

Силуянова М. В.*, Попова Т. В.**

МАТИ - Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского, Оршанская, 3, Москва, 109240, Россия

*e- mail: dc2mati@yandex.ru

**e- mail: tapopova88@yandex.ru

Аннотация

В статье проведено расчетное исследование теплообменного аппарата пластинчатого типа. В ходе исследования разработана и описана трехмерная расчетная методика. Проведена верификация разработанной методики на основании критериальных зависимостей. В рамках верификации рассмотрены структурированная гекса сетка и автоматическая тетра сетка. В ходе сравнения сеток выбран наиболее удобный вариант.

Ключевые слова: топливная эффективность, сложный цикл, теплообменник.

Введение

Одним из основных направлений развития газотурбинных двигателей (ГТД) является класс мощностью 30...500 кВт. Расход воздуха в таких ГТД составляет 0,5...2,5 кг/сек. Двигатели этого класса мощности широко применяются в различных сферах промышленности.

Наиболее важным требованием является высокая топливная эффективность. Традиционный путь повышения топливной эффективности – повышение параметров цикла. Но на практике существующие материалы и технологии накладывают сильные ограничения на параметры цикла. Проблема дальнейшего повышения топливной эффективности решается с помощью применения сложных термодинамических циклов [1]. Одним из наиболее значимых элементов в схеме ГТД со сложным циклом является теплообменный аппарат (ТА). Компактность теплообменника важный параметр, компактные теплообменники обеспечивают большой удельный теплоотвод при сравнительно малом их объеме и весе. Наиболее высокими показателями компактности и технологичности обладают пластинчатые теплообменные аппараты [2,3]. Сравнение различных поверхностей по удельной теплопередаче показало наибольшую эффективность поверхности Френкеля, обладающей также минимальным весом и объемом при прямом сопоставлении поверхностей. В данной статье решается задача верификации трехмерной методики расчета и экспериментальных данных.

Трехмерный метод расчета

Методика трехмерного расчета базируется на расчетном программном комплексе Ansys CFX и ANSYS Meshing. Расчетная модель состоит из трех элементов: модели металла, модели холодного теплоносителя и модели горячего теплоносителя. Расчетные модели создаются в трехмерных программах проектирования, таких как Autodesk Inventor, Solid Works и др. Генерация сетки

производится в ANSYS Meshing. Фрагменты расчетных моделей представлены на рис. 1. Расчет производится для одного конверта, это учитывается при задании граничных условий. На поверхности горячего теплоносителя и металла, не соединенных между собой накладывается зависимость периодичности, благодаря которой происходит перенос информации о процессах, происходящих на поверхности элементов расчетной модели, с одной поверхности на другую.

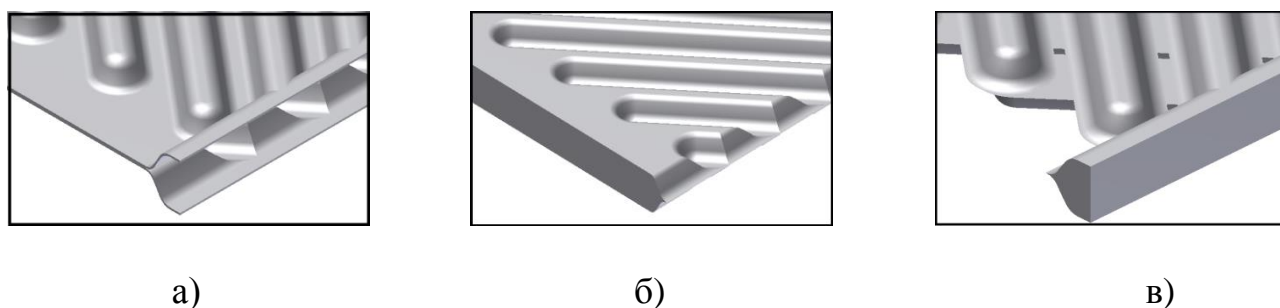


Рис. 1 Фрагменты расчетных моделей для поверхности «Френкеля».

а) модель металла, б) модель холодного теплоносителя, в) модель горячего теплоносителя.

Модель теплоносителя б) или в) в расчете может рассматриваться и как холодный, и как горячий теплоноситель.

В методике расчета используется наиболее устойчивая пара граничных условий – на входе задается расход теплоносителя и его температура, на выходе среднее или статическое давление.

Для создания простой методики расчета модели пластины теплообменного аппарата и получения максимально достоверных качественных оценок при минимальных затратах компьютерных мощностей и времени использовался способ автоматического тетрадного построения сетки. Численное моделирование

турбулентных течений выполнялось на основе RANS, а именно использовалась модель SST, которая является модификацией k-ε модели с добавлением пристеночных функций. Выбор данной модели турбулентности обусловлен наилучшей сходимостью полученных расчетных результатов с экспериментальными данными.

Обработка расчетных данных

В исследовании использовались следующие формулы для определения основных параметров:

1) Число Рейнольдса определялось по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot d_g \cdot \rho}{\mu} \quad (1)$$

или

$$Re = \frac{V \cdot d_g \cdot \rho}{\mu} = \frac{V \cdot d_g \cdot \rho \cdot F_g}{\mu \cdot F_g} = \frac{d_g \cdot G}{\mu \cdot F_g}$$

где d_g – гидравлический диаметр, V – скорость течения потока, ρ – плотность теплоносителя, μ – коэффициент динамической вязкости.

2) Гидравлический диаметр определялся по формуле:

$$d_g = \frac{4F_{1g}}{P_i} \quad (2)$$

где F_{1g} – площадь живого сечения одного канала гофра, P_i – периметр профиля гофра (рис.2). Общая площадь живого сечения составляет:

$$F_g = F_{1g} \cdot Z_k \quad (3)$$

Где Z_k – количество гофров.

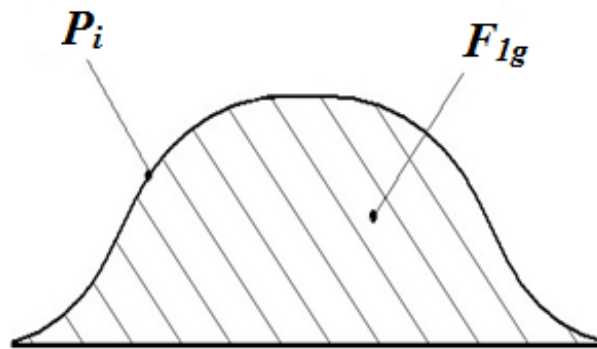


Рис.2 Геометрические параметры канала.

P_i и F_{1g} определялись с помощью программ трехмерного проектирования, в которых были созданы расчетные модели.

3) Определение числа Nu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_g}{\lambda} \quad (3)$$

Где α – коэффициент теплоотдачи теплоносителя, λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя.

4) Для определения коэффициентов теплоотдачи теплоносителей использовались формулы:

$$\alpha = \frac{Q}{(T_{avh} - T_{avm}) F_{he}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{Q}{(T_{avm} - T_{avc}) F_{he}} \quad (5)$$

Где Q – количество тепла, переданное через площадь теплопередачи F_{he} . T_{avh} , T_{avc} и T_{avm} – средние температуры горячего, холодного теплоносителя и металла.

5) Для определения коэффициента потерь ξ использовалась формула:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot d_g \cdot P_{av} \cdot F_g^2}{G^2 \cdot L \cdot R \cdot T_{av}} \quad (6)$$

где $\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet}$.

T_{av} и P_{av} – средняя температура и давление теплоносителя.

L – длина стороны, по которой течет теплоноситель.

Представленные формулы использованы при расчете данных для проведения верификации трехмерной методики расчета.

Верификация трехмерного метода расчета

Для подтверждения работоспособности трехмерной методики, моделировалась работа теплообменной пластины с поверхностью Френкеля. На рис.3 показаны основные размеры гофра.

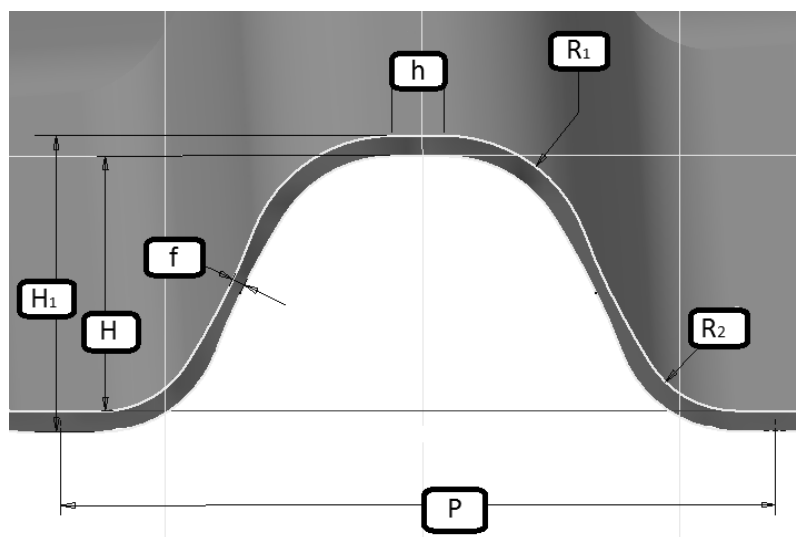


Рис.3 Основные геометрические параметры гофра.

В настоящее время завершается стадия планирования эксперимента. В данной работе приведена верификация расчетных данных с экспериментальными данными, взятыми из работы [4].

Рассмотрен угол скрещивания гофр равный 60° с параметрами гофра, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические параметры гофра экспериментальной пластины.

Н, мм	Н ₁ , мм	Р, мм	d_g	Р/Н ₁	Р/Н
8,75	8,00	32,00	13,84	4,00	3,66

При верификации рассматривались два вида сеток: тетра-сетка и гекса-сетка. Результаты верификации представлены на рис. 4. В первом случае (тетра-сетки) пограничный слой не строился. Во втором случае пограничный слой построен, высота первого пристеночного элемента составляла 0,05 мм.

Результаты численного моделирования показали хорошую сходимость с экспериментальными данными, особенно при числах Рейнольдса выше 2000. В случае гекса-сетки при $Re = 2700$ и выше произошло максимальное сближение расчетной и экспериментальных кривых 1%.

Расхождение экспериментальных и расчетных данных при числах Рейнольдса меньше 2000 составляет ~20% у гекса-сетки и 25-27% для тетра-сетки. При более высоких числах Рейнольдса сходимость расчетных и экспериментальных данных растет: у гекса-сетки — 1-8% и 9-15 % для тетра-сетки.

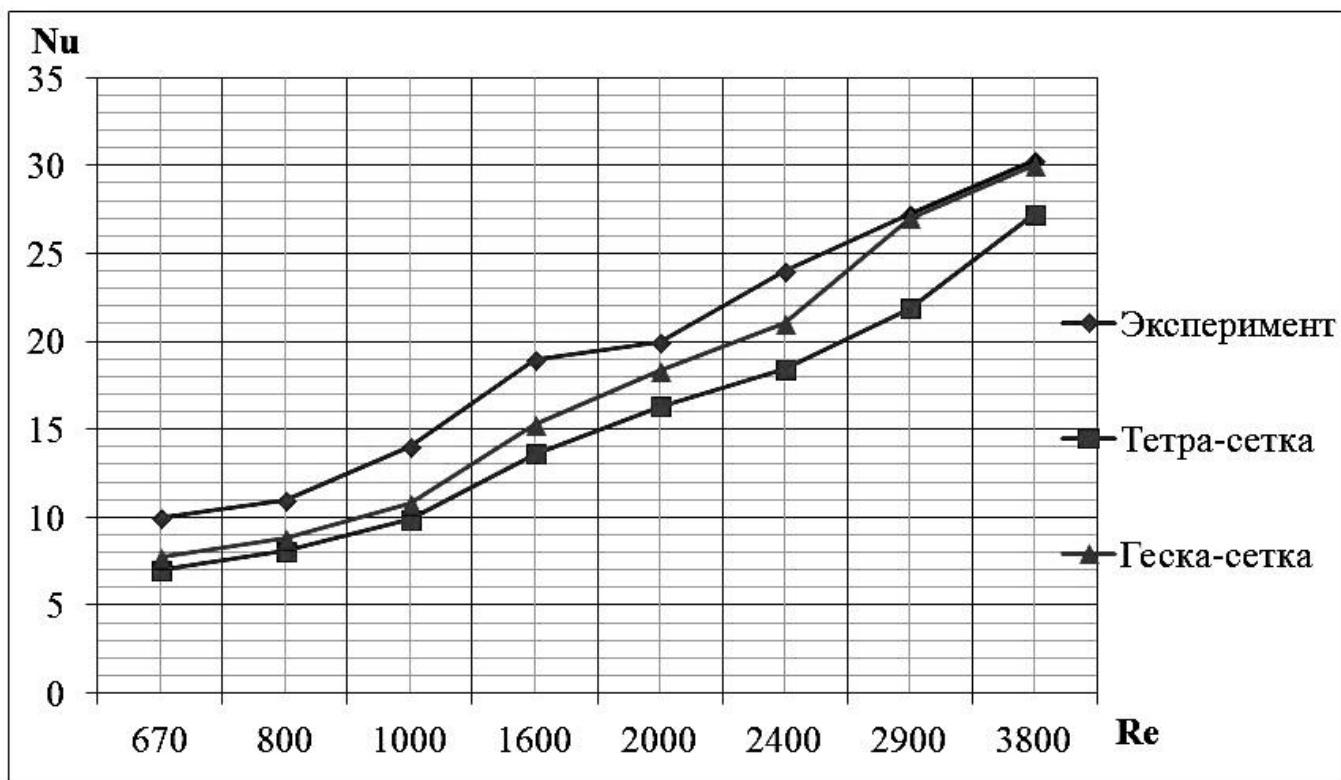


Рис.4 Верификация расчетных и экспериментальных данных (Зависимость Nu (Re) при угле скрещивания гофра 60°).

Из этого можно сделать вывод, что обе сетки дают удовлетворительные результаты по расчетам. Однако построение гекса-сетки представляет собой трудоемкий процесс, отнимающий много времени. Не смотря на менее точные результаты, полученные при расчете с тетра-сеткой, с учетом затраченного времени целесообразно использовать именно этот вариант построения сетки. В реальных условиях, расчет ТА для ГТД сложного цикла проводится при числах Рейнольдса ≈ 1600 и выше. Расчет с использованием тетра-сетки позволяет получить расчетные данные с погрешностью не более 10-20 % при таких числах Re и занимает меньше времени в несколько раз, поэтому данный вид сетки выбран как наиболее целесообразный вариант.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать и подтвердить работоспособность методики трехмерного расчета пластинчатых теплообменных аппаратов. Данная методика расчета позволяет получать достоверную качественную оценку расчетных зависимостей, а так же позволяет увидеть структуру течения по тракту теплообменника (поля температур, давлений и скоростей).

Методика позволяет оценить эффективность и суммарные потери давления в теплообменнике, выявить оптимальные массогабаритные показатели ТА при заданных температурах и давлениях по обеим сторонам.

Библиографический список

1. Силуянова М.В., Попова Т.В. Сравнительный анализ схем сложных термодинамических циклов микротурбин // Научные труды «Вестник МАТИ». 2014. № 22(94). С. 94-99.
2. Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1977. – 108 с.
3. Савостин А.Ф., Тихонов А.М. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей теплообмена // Теплоэнергетика. 1970. №9. С. 75 -78.
4. J. Stasiek, M.W. Collins, M. Ciofalo и P.E. Chew. Investigation of flow and heat transfer in corrugated. Passages-1. Experimental results // Pergamon – Великобритания, 1996. 16 с.
5. Попова Т.В., Дробыш М.В. Исследование пластинчатого теплообменного аппарата с волновой поверхностью. Тезисы докладов. – Казань, 2013, С 163-166.

6. Кэйс В.М., Лондон А.Л.. Компактные теплообменники. – М.: Энергия, 1967. – 226 с.