

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА В ФОРСАЖНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2018

В. Р. Нелюбин Главный специалист – начальник группы горения;
Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки, г. Москва;
nelvr@mail.ru

Применение программ 3D-моделирования и, в частности, программ NX и ANSYS вывело на новый уровень проектирование и доводку камер сгорания в газотурбинных двигателях, так как позволяет улучшить характеристики (увеличение полноты сгорания, уменьшение радиальной и окружной неравномерности полной температуры газа) и также определить слабые места конструкции. Проведён анализ потока струй топлива из пальцевых распылителей форсажной камеры сгорания газотурбинного двигателя. Сформулирована задача оптимизации распределения топлива: варьируя диаметрами отверстий в топливных коллекторах, равномерно распределить топливо на выходе из жаровой трубы. Наложены ограничения на задачу оптимизации – уменьшена в пять раз подача топлива в периферийную зону на выходе из форсажной камеры. Эффект оптимизации проверен путём сравнения полноты сгорания топлива при базовом распределении топлива с оптимизированным вариантом распределения с использованием программ 3D-моделирования NX и ANSYS. В результате – повышение полноты сгорания на всех форсажных режимах работы двигателя.

Газотурбинный двигатель; форсажная камера сгорания; жаровая труба; пальцевый распылитель; распределение топлива; оптимизация.

Цитирование: Нелюбин В.Р. Оптимизация распределения топлива в форсажной камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 4. С. 93-101. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-93-101

Введение

Для оценки полноты сгорания форсажного топлива, улучшения теплового состояния теплозащитных экранов и оптимизации распределения топлива в форсажной камере (ФК) реального изделия требуется провести ряд работ: создание расчётной модели, расчёт параметров, постановка и решение задачи оптимизации, сравнительные расчёты на ключевых режимах работы двигателя, анализ результатов.

Расчёт проводился на трёх режимах работы двигателя для базового варианта распределения топлива.

Оценивались следующие форсажные режимы:

- стендовый режим $H = 0$, $M = 0$;
- околоземный режим $H = 0$, $M = 1,22$;
- высотный режим $H = 13$ км, $M = 2$.

Оптимизация распределения топлива в ФК проведена на околоземном режиме работы двигателя. Дополнительные сравнительные расчёты проведены при изменённой схеме распределения топлива на двух форсажных режимах работы двигателя (стендовый и высотный) с целью определения эффекта по полноте сгорания топлива.

На рис. 1 показана схема ФК изделия, для которого проводилась оптимизация распределения топлива. На ней видны смеситель газа из турбины низкого давления с воздухом из второго контура, стабилизаторы пламени, пальцевые распылители топлива, кок, экран и сопло.

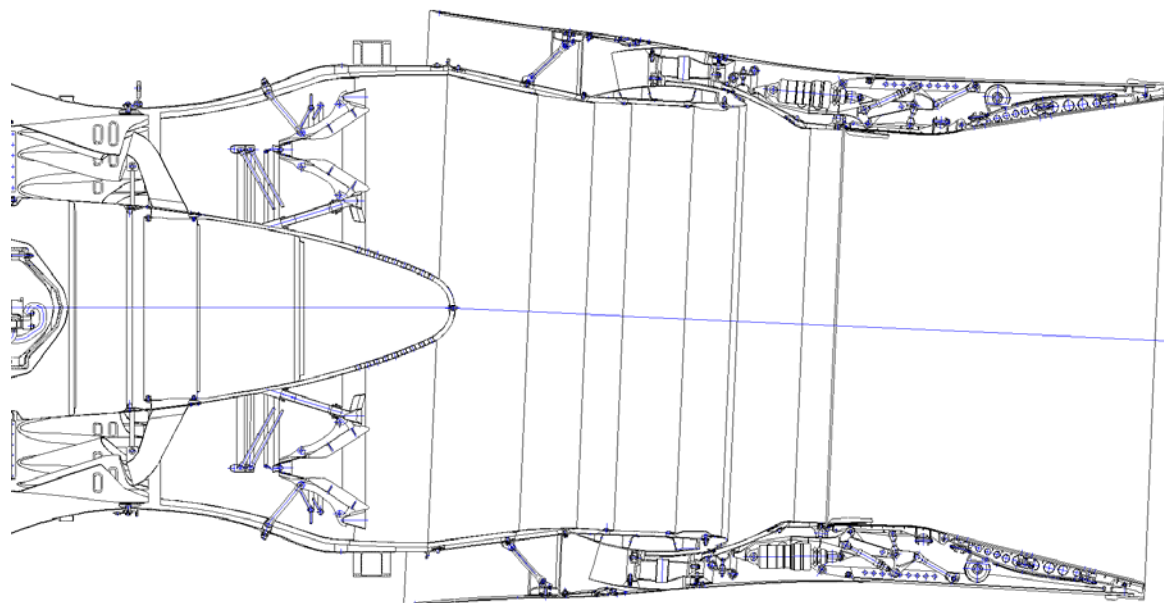


Рис.1. Схема форсажной камеры

Постановка задачи оптимизации

Критерием оптимальности выбрано равномерное распределение топлива на выходе из форсажной камеры и как следствие – максимальная полнота сгорания.

Ограничения в задаче оптимизации: недопущение превышения максимальной полной температуры газа в пристеночном слое у кока и стенки ФК, примыкающей к соплу, которая была получена при расчёте базового варианта распределения форсажного топлива.

Вектор управления в задаче оптимизации: расходы топлива из каждого отверстия пальцевых распылителей всех топливных коллекторов ФК или диаметры этих отверстий.

На рис. 2 показаны траектории центров струй топлива из двух произвольных отверстий в пальцевых распылителях топлива для случая, если бы топливо не сгорало. Эти траектории взяты из результатов расчёта с учётом всех реальных загромождений в форсажной камере сгорания.

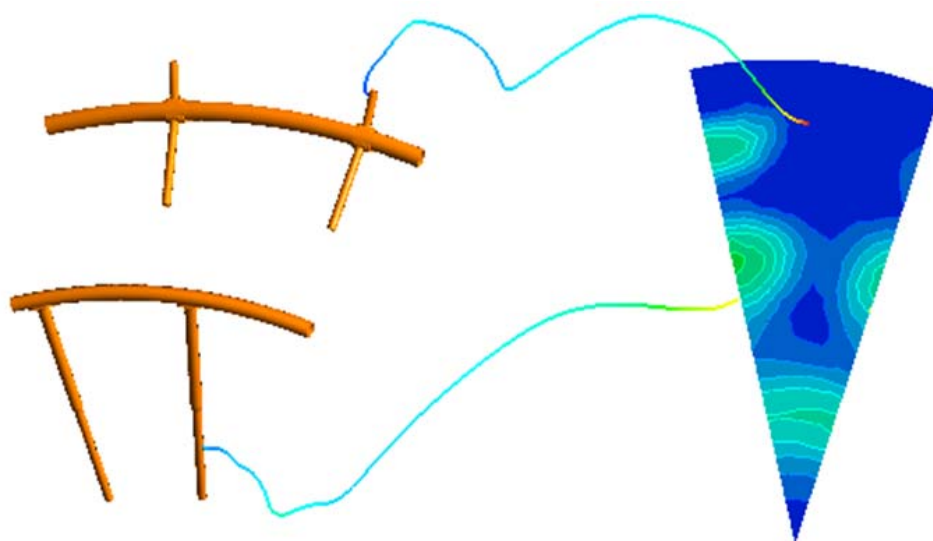


Рис.2. Траектории центров струй топлива из отверстий

Построение расчётной модели

На рис. 3 показана 3D-модель газовой области 360°/11 сектора форсажной камеры, которая использовалась для расчётов. Эта модель построена с помощью программы NX [1].

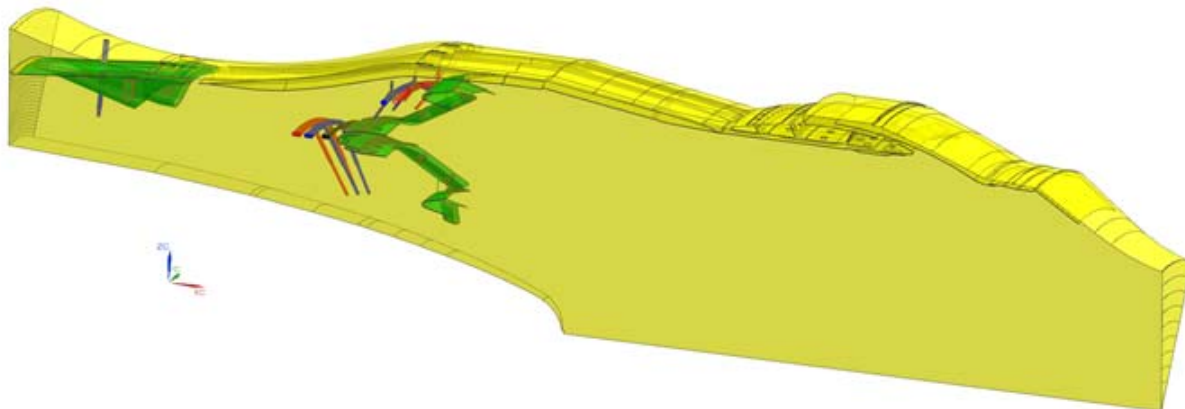


Рис. 3. 3D-модель газовой области сектора ФК

В расчётной модели приняты следующие упрощения:

- проведено спрямление оси ФК;
- выделен сектор периодичности 360°/11;
- удалены стойки задней опоры, створки сопла и несущественные крепежные элементы конструкции;
- добавлена термopара;
- удалены антивибрационные отверстия в коке.

При проведении компьютерного моделирования использовался программный комплекс ANSYS [2].

Для проведения расчёта программой ANSYS CFX была построена сетка модели с помощью программы ANSYS ICEM (рис. 4).

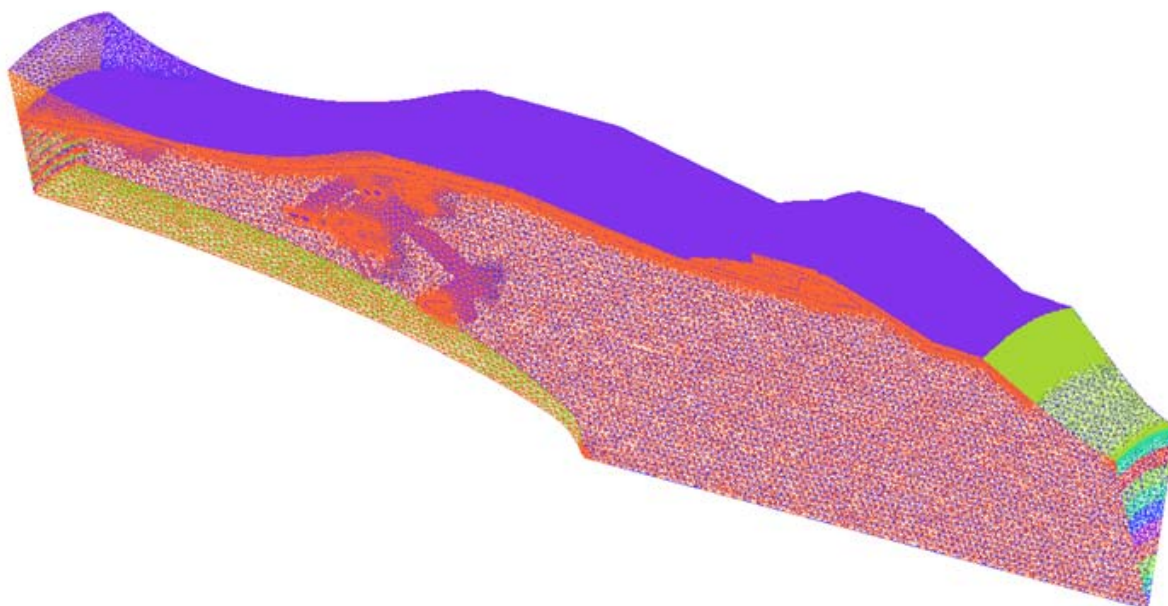


Рис. 4. Сетка модели: количество элементов (узлов) 59529058

В каждом узле сетки программа ANSYS CFX рассчитывает все газодинамические параметры газа: температуру, давление, скорость, удельные расходы всех составляющих газа, векторы направления движения газа и т.д. По выбранным плоскостям (разрезам) программа позволяет зафиксировать поля распределения температуры, давления, скорости и расходных характеристик составляющих газа (O₂, H₂O, CO, CO₂, N, NO, AJet). Это обстоятельство используется в том числе и для оценки результатов модернизации конструкции форсажной камеры.

На рис. 5 показаны кольцевые топливные коллекторы форсажной камеры, из которых выступают пальцевые распылители (трубки с отверстиями), из которых топливо (керосин) струями выбрасывается поперёк потока основного движения газа. Диаметры этих отверстий и являются предметом обсуждения. Задача состоит в выборе их диаметров такими, чтобы обеспечить максимально возможную полноту сгорания топлива на выбранном режиме работы двигателя.

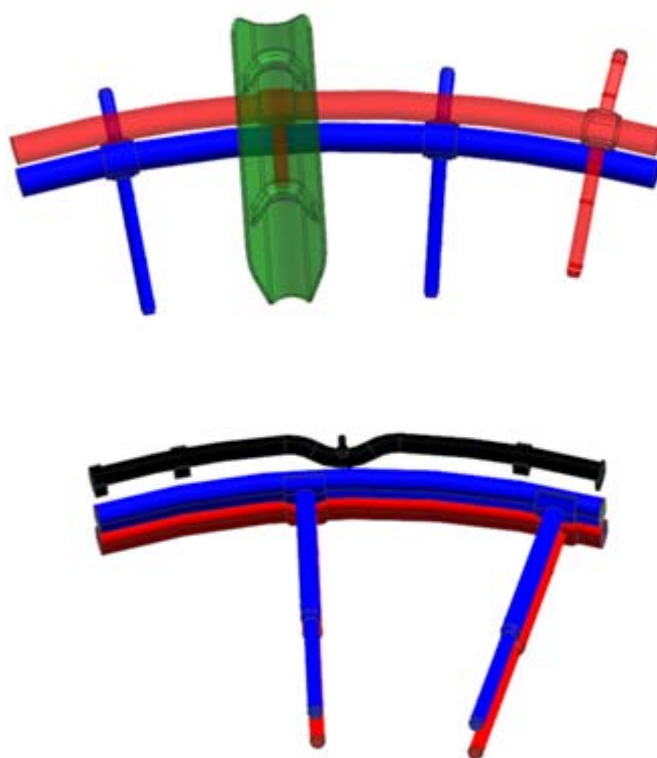
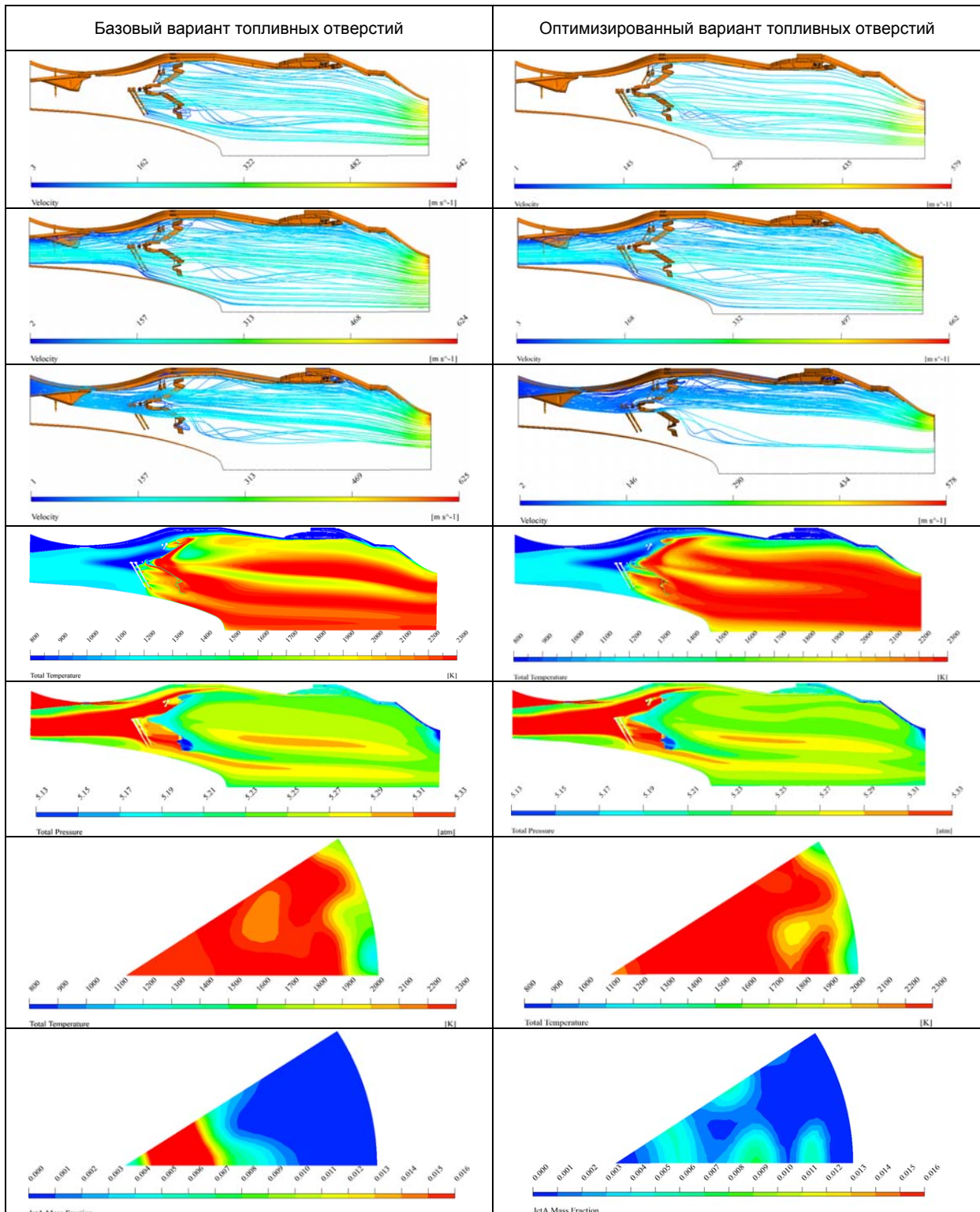


Рис. 5. Расположение топливных коллекторов (вид по полёту)

Результаты расчёта

В табл. 1 приведены диаграммы скоростей потоков топлива, скоростей газа из турбины низкого давления и воздуха из второго контура двигателя, полной температуры газа в разрезе радиального стабилизатора, полного давления в разрезе радиального стабилизатора, полной температуры газа на выходе из ФК, остатка топлива на выходе из ФК соответственно.

Таблица 1. Околосредный режим ($H = 0, M = 1,22$)

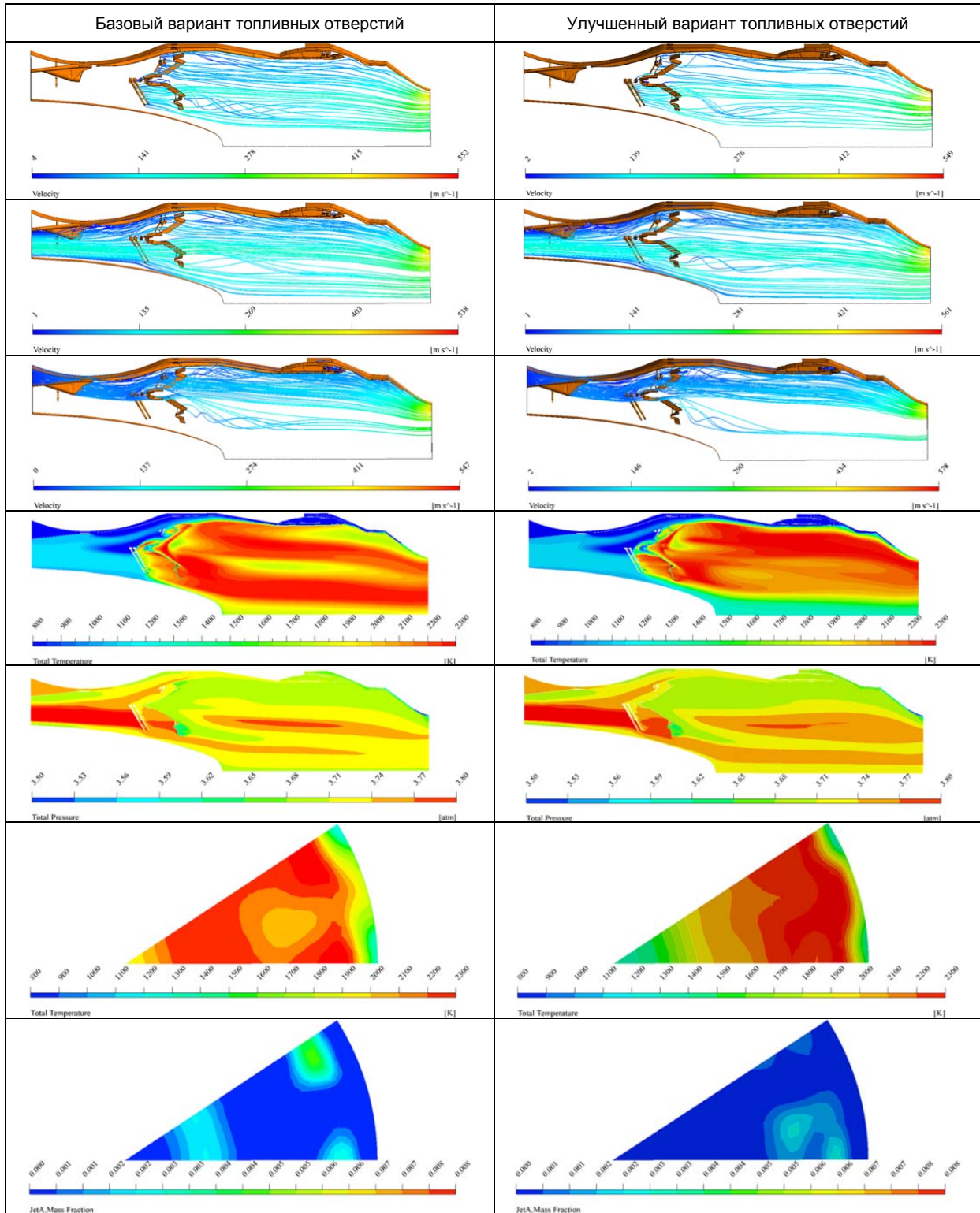


На околосредном режиме полная температура газа на выходе из ФК составила 2176 К при полноте сгорания топлива 92,89% в базовом варианте распределения форсажного топлива. После оптимизации полная температура газа на выходе из ФК составила 2221 К при полноте сгорания топлива 96,25%, что на 3,36% больше, чем для базового варианта. Максимальная полная температура газа в пристеночном слое у стенки кока уменьшилась на 68 градусов (с 1481 до 1413 К), а у стенки ФК в критическом се-

чении поднялась на 3 градуса (с 1663 до 1666 К). Очень показательна последняя строка в табл. 1, где отчётливо видна зона несгоревшего топлива на выходе из ФК в базовом варианте распределения топлива, и которой не стало после проведённой оптимизации.

В табл. 2 приведены параметры расчётов на стендовом режиме ($H = 0$, $M = 0$).

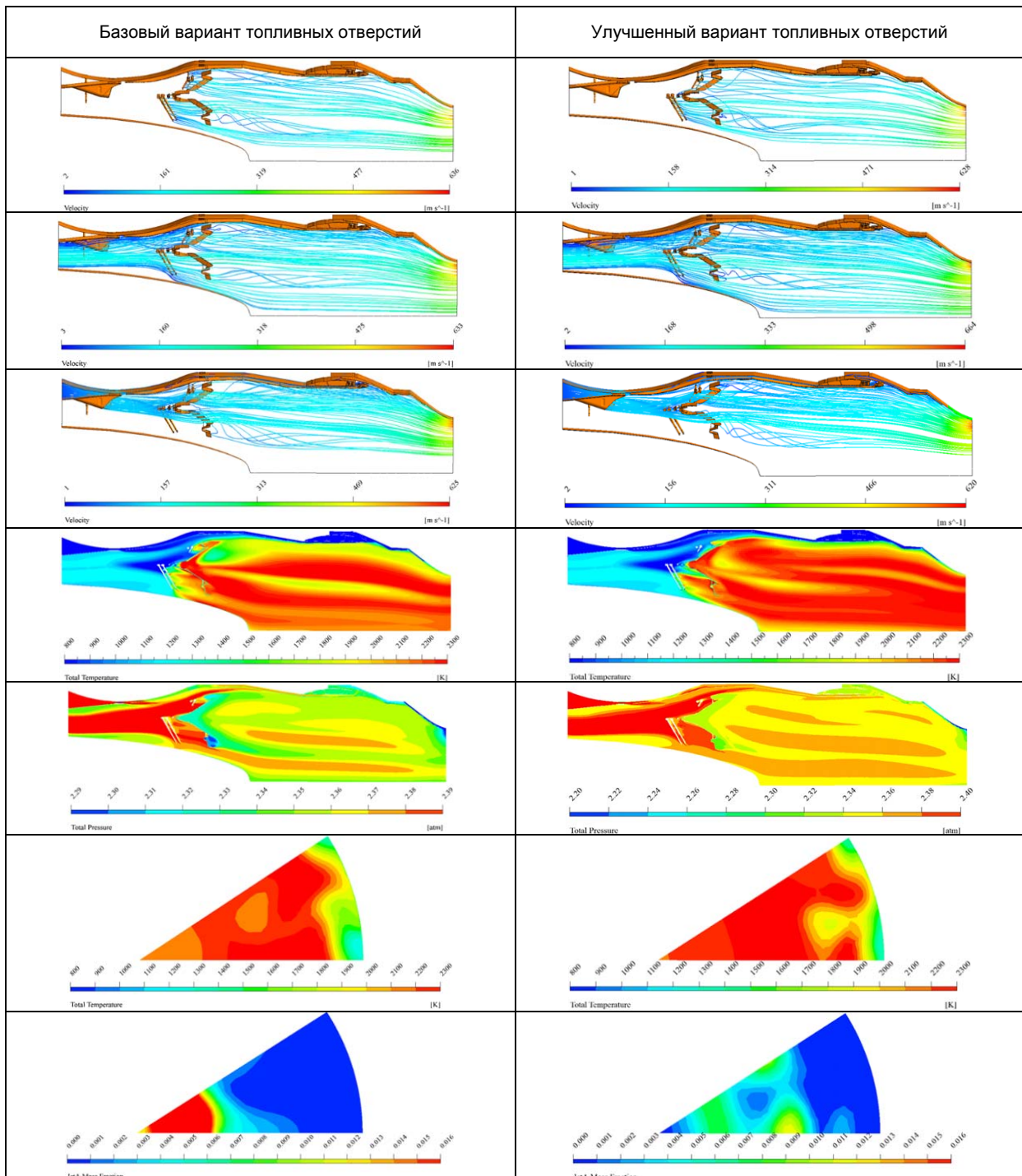
Таблица 2. Стендовый режим



На этом режиме полная температура газа на выходе из ФК составила 2092 К при полноте сгорания топлива 98,45% в базовом варианте распределения форсажного топлива. После доработки полная температура газа на выходе из ФК составила 2100 К при полноте сгорания топлива 98,97%, что на 0,52% больше, чем для базового варианта. Максимальная полная температура газа в пристеночном слое у стенки кока уменьшилась на 142 градуса (с 1298 до 1156 К), а у стенки ФК в критическом сечении поднялась на 21 градус (с 1625 до 1646 К).

В табл. 3 приведены параметры расчётов на высотном режиме ($H = 13$ км, $M = 2$).

Таблица 3. Высотный режим



На этом режиме полная температура газа на выходе из ФК составила 2146 К при полноте сгорания топлива 92,58% в базовом варианте распределения форсажного топлива. После доработки полная температура газа на выходе из ФК составила 2176 К при полноте сгорания топлива 94,66%, что на 2,08% больше, чем для базового варианта. Максимальная полная температура газа в пристеночном слое у стенки кока уменьшилась на 47 градусов (с 1355 до 1308 К), а у стенки ФК в критическом сечении поднялась на 16 градусов (с 1627 до 1643 К).

На остальных форсажных режимах работы двигателя были проведены аналогичные сравнительные расчёты, которые также подтвердили положительный эффект по полноте сгорания форсажного топлива.

Оптимизация проводилась с помощью программы Microsoft Excel. В результате проведённой оптимизации диаметры сорока восьми отверстий в пяти топливных коллекторах были изменены. Проверка эффективности модернизации конструкции форсажной камеры проводилась с помощью программы ANSYS CFX.

Заключение

На околоземном режиме ($H = 0$, $M = 1,22$) достигнуто увеличение полноты сгорания форсажного топлива на 3,36%.

На стендовом режиме ($H = 0$, $M = 0$) полнота сгорания топлива увеличилась на 0,52%.

На высотном режиме ($H = 13$ км, $M = 2$) полнота сгорания топлива увеличилась на 2,08%.

Оптимизация распределения форсажного топлива позволила уменьшить длины пальцевых распылителей, а некоторые вообще удалить. Тем самым уменьшился вес конструкции и увеличилась прочность пальцевых распылителей за счёт уменьшения их выноса от точки крепления. Уменьшилась потеря полного давления газа за счёт уменьшения загромождения в тракте прохождения газа в форсажной камере сгорания.

Таким образом, оптимизация распределения форсажного топлива позволила увеличить полноту сгорания топлива и тягу двигателя на всех форсажных режимах работы.

Библиографический список

1. Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С. В., Сотник Д.Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: ДМК-Пресс, 2012. 504 с.
2. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК-Пресс, 2017. 210 с.

OPTIMIZATION OF FUEL DISTRIBUTION IN THE AFTERBURNER OF A GAS TURBINE ENGINE

© 2018

V. R. Nelyubin Chief Specialist, Head of the Combustion Group;
Experimental Design Bureau named after A. Lyulka,
Moscow, Russian Federation;
nelvr@mail.ru

The use of 3-D simulation programs and in particular NX and ANSYS simulators brought the design and fine tuning of gas turbine engine combustion chambers to the next level, as it allows improving the performance (increased combustion efficiency, reduced radial and circumferential non-uniformity of the total gas temperature), as well as determining the weak points of the structure. The article analyzes the flow of fuel jets from the finger sprayers of the afterburner of the combustion chamber of a gas turbine engine. The problem of optimizing the distribution of fuel is formulated: the fuel at the exit of the flame tube is to be evenly distributed by varying the diameters of the holes in the fuel manifolds. Restrictions are imposed on the optimization problem – the supply of fuel to the peripheral zone at the outlet of the afterburner is reduced by a factor of five. The optimization effect is verified by comparing the fuel combustion efficiency in the case of standard fuel distribution with the optimized distribution option using the NX and ANSYS 3-D simulations. As a result, we observe an increase in combustion efficiency in all afterburner modes of engine operation.

Gas turbine engine; afterburner; finger atomizer; flame tube; fuel distribution; optimization.

Citation: Nelyubin V.R. Optimization of fuel distribution in the afterburner of a gas turbine engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 4. P. 93-101. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-93-101

References

1. Goncharov P.S., Artamonov I.A., Khalitov T.F., Denisikhin S.V., Sotnik D.E. *NX Advanced Simulation. Inzhenernyy analiz* [NX Advanced Simulation. Engineering analysis]. Moscow: DMK-Press Publ., 2012. 504 p.
2. Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Fundamentals of work in ANSYS 17]. Moscow: DMK-Press Publ., 2017. 210 p.