

13. Пределы стабильного сгорания обедненных бензозвоздушных смесей в ДВС при различных способах интенсификации. / Р у с а к о в М.М. и др. – В сб.: Труды XI симпозиума по горению и взрыву, г. Черноголовка, 1996.

УДК 621.452.3 : 621.43.056

## ПРОГРАММА РАСЧЕТА И АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР НА ВЫХОДЕ ИЗ ОСНОВНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Диденко А.А., Лукачев С.В.  
Крыжановский А.И., Лавров В.Н., Цыбизов Ю.И.

*Самарский государственный аэрокосмический университет,  
ОАО СНТК имени Н.Д. Кузнецова, г. Самара*

### 1. ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

При доводке авиационных ГТД по надежности и ресурсу важной информацией являются данные о состоянии температурного поля на выходе из основной камеры сгорания (КС), в первую очередь с точки зрения прочности и ресурса лопаток газовой турбины [1, 2]. Поле температур при этом контролируется по величине средней окружной неравномерности, вычисленной по данным для 5-7 поясов выходного сечения, а также по форме средней радиальной эпюры, построенной по данным для тех же самых поясов [3].

Обе эти характеристики – и средняя окружная неравномерность, и радиальная эпюра температур – являются некоторыми средними для всего поля характеристиками, составленными на основе температурных отклонений из различных участков потока. Поэтому они дают лишь номинальное представление о температурном поле. При устранении же дефектов турбины и самой КС, которые имеют причины часто локального происхождения, желательно иметь информацию о поле в виде подробной топографической карты, т.е. в виде изолиний, с привязкой к расположению форсунок, местам установки стоек и т.п. Такое подробное представление поля позволяет наглядно увидеть расположение «горячих» и «холодных» пятен и проконтролировать динамику их ослабления или устранения в ходе доводки камеры сгорания

В работе [4] упоминалось уже о вычислительной программе, разработанной в НИЛ-49 СГАУ, позволяющей на основе данных, полученных с помощью поворотной термогребенки, построить методами сплайн-

интерполяции температурное поле в изолиниях. В данной работе несколько подробнее иллюстрируются возможности этой программы и дается анализ полученных с её помощью материалов по полям температур для КС существующих крупнотоннажных двигателей, в частности, из семейства «НК».

Хотелось бы отметить, что указанная вычислительная программа разрабатывалась не столько для формальной статистической обработки температурных полей, сколько для анализа влияния конструкции КС на выходное температурное поле и для получения подробной информации о его локальной неравномерности. Предполагается, что масштаб температурной неравномерности, а также количество локальных пиков-провалов температур, т.е. степень «изрезанности» (развитости) температурного поля, отражает наличие высокотемпературных зон в пламени, интенсивность или завершенность процессов перемешивания. Следовательно, с уровнем локальной неравномерности температурного поля должны также коррелировать характеристики по выбросам вредных веществ из КС. В частности, предполагается обнаружить связь между уровнем температурной неравномерности и эмиссией окислов азота  $\text{NO}_x$  [5, 6].

## *2. ИНФОРМАЦИЯ ПО ПОЛЯМ ТЕМПЕРАТУР, ПРЕДОСТАВЛЯЕМАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММОЙ*

На рис.1 и 2 представлен весь объем информации, который позволяет получить существующая версия программы.

Температурное поле сначала представляется в форме компактного прямоугольника (1, рис.1 а) с указанием координат в радиальном и окружном направлениях. Под прямоугольником выводится числовая информация о поле – слева для всего поля (2), справа для выделенного по желанию участка (3) (он показан штрих-пунктирной рамкой на прямоугольнике (1)), внизу, справа (4) – указываются координаты и величина температуры для произвольной точки поля (5), на которую можно установить подвижный, управляемый с клавиатуры ПК маркер. С помощью маркера можно подробно проанализировать любую локальную область поля, в частности, проверить точность аппроксимации. Информация по полю (2) содержит в вертикальных колонках данные о температурных поясах (уровнях), относительной величине площади, занимаемой каждым из поясов, средней величине температуры для каждого пояса и величине её отклонения от среднемассовой температуры для всего поля. Справа две колонки (6) содержат данные о числе пиков-провалов

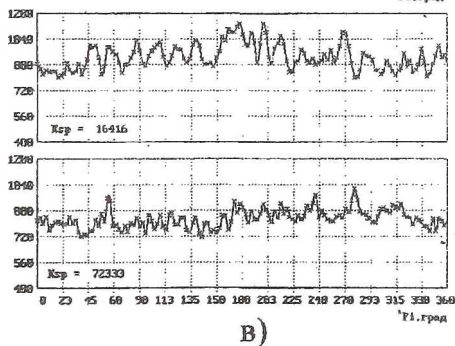
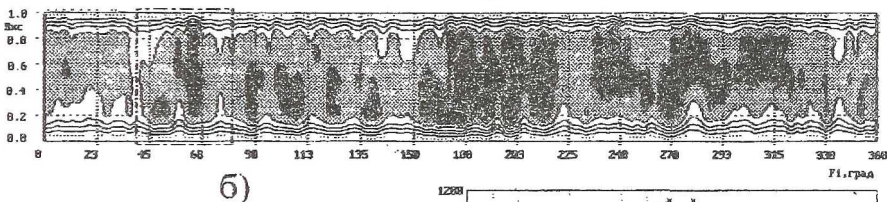
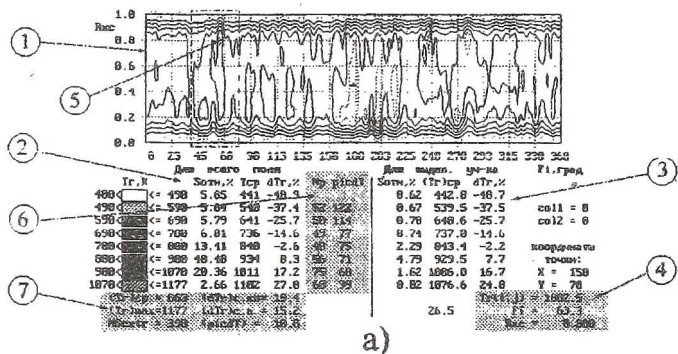


Рис. 1. Поле температур на выходе из КС авиационного ГТД:

- а) сжатое изображение поля в прямоугольной рамке с полной числовой информацией о нем и о выбранном участке;
- б) растянутое изображение поля;
- в) окружающие эпюры температур газа для всего поля

температуры для каждого из 7-ми уровней, а также средний размах пика-провала в градусах температуры. Внизу по этим колонкам выводятся данные (7) о среднемассовой температуре газа, о максимальной температуре, о величине среднеквадратичного и средне-арифметического отклонения температур поясов от среднемассовой температуры. Точка с максимальной температурой для всего выходного сечения указывается в поле (1) маленьким треугольником.

Для того, чтобы можно было подробнее рассмотреть детали поля оно представляется в более вытянутом масштабе (рис.1 б) с закрашенными по желанию самыми высокотемпературными поясами и «пятнами».



Ниже (рис. 1 в), опять же по желанию пользователя, выводится несколько профилей температуры в окружном направлении для различных уровней по высоте выходного сечения.

Всего в процессе анализа, после аппроксимации экспериментальных данных, можно получить информацию о чуть более 80 тысячах элементарных участков (точек) поля, которая оставляется на хранение в специальном файле данных на жестком диске компьютера.

Завершается обработка построением температурного поля для кольцевой действительной формы сечения (рис. 2). При этом обработка и построение ведется последовательно для 4-х секторов. Число секторов и степень подробности можно увеличить.

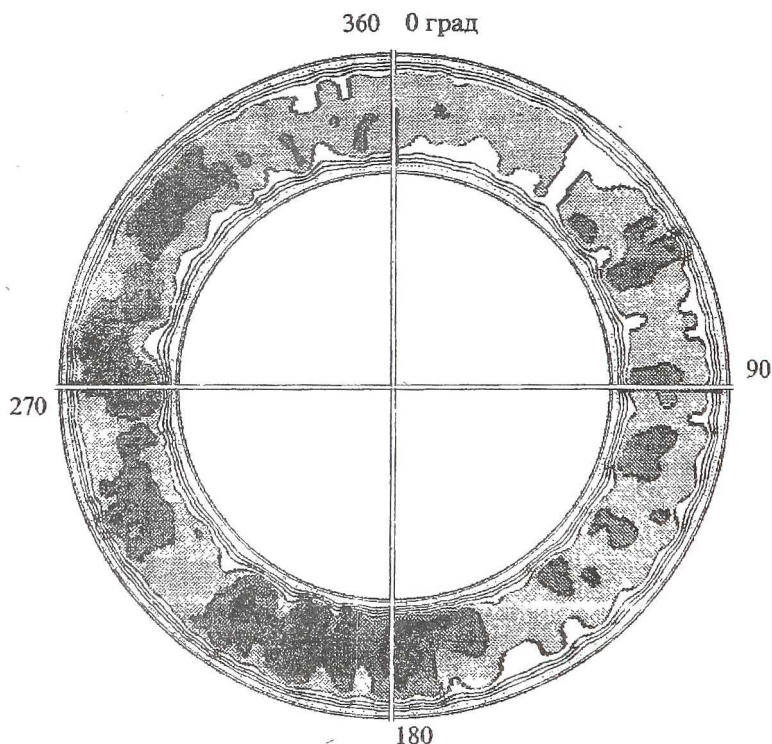


Рис. 2. Поле температур для кольцевой формы сечения на выходе из КС.

Если поле температур измерено для режима с низким давлением подачи топлива, а диаметры камеры большие; то нижние форсунки оказываются не-

сколько перегруженными по расходу топлива за счет дополнительного давления собственного его гидростолба в общем коллекторе. В этом случае имеется возможность внести поправку на величину гидростолба и скорректировать температурное поле.

Вычислительная программа написана на языке программирования BASIC Professional Development System 7.1. Раскрашивание поясов производится либо в ходе выполнения самой программы, либо при последующей обработке с помощью любого из редакторов обработки изображений. При подготовке материалов данной статьи раскрашивание поясов температур и шивка секторов поля производились средствами Adobe PhotoShop 5.0.

### 3. АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

На рис. 3 сведены воедино данные из распечаток (информация 2, рис. 1а) по полям температур для КС различных изделий. Графики построены как зависимости относительной площади  $\Delta S_{\text{отн}}$ , занимаемой соответствующим температурным поясом, от величины отклонения  $\overline{\Delta T}$  средней для него температуры от среднемассовой температуры для всего поля  $T_{г.ср}^*$ . Данный график показывает, какая доля от общего сечения потока приходится на ту или иную температуру. Несмотря на ограниченность имеющейся пока ещё информации, можно, однако, отметить уже следующее.

Во-первых, хотя поля в своих деталях существенно различаются, но графики зависимостей относительной площади  $\Delta S_{\text{отн}}$  от отклонения соответствующей для них температуры  $\overline{\Delta T}$  имеют ярко подобное протекание. Для всех имеющихся полей (за исключением поля № 5) относительные площади с «холодными» ( $\overline{\Delta T} = 10... -50\%$ ) и горячими температурами ( $\overline{\Delta T} = -0...30\%$ ) имеют приблизительно одинаковую величину. При этом, площади, соответствующие каждой из «холодных» температур, занимают примерно 3...8% от общей площади потока и имеют приблизительно равномерное распределение. Причем, последнее имеет место независимо от степени развитости («изрезанности» по изолиниям) самого поля. Площади же с относительно «горячими» температурами изменяются, напротив, в широком диапазоне - от 3...8 до 30...40% и имеют симметричное примерно распределение относительно температуры с максимальной  $\Delta S_{\text{отн}}$ . Очевидно, отмеченное подобие в распределениях относительных площадей, занимаемых различными темпера-

турными поясами, можно использовать в проектных термодинамических расчетах, там, например, где требуется учесть неравномерность выходного поля по местным  $T_T^*$ . График следует понимать так – чем уже распределение относительной площади, тем более равномерным является поле.

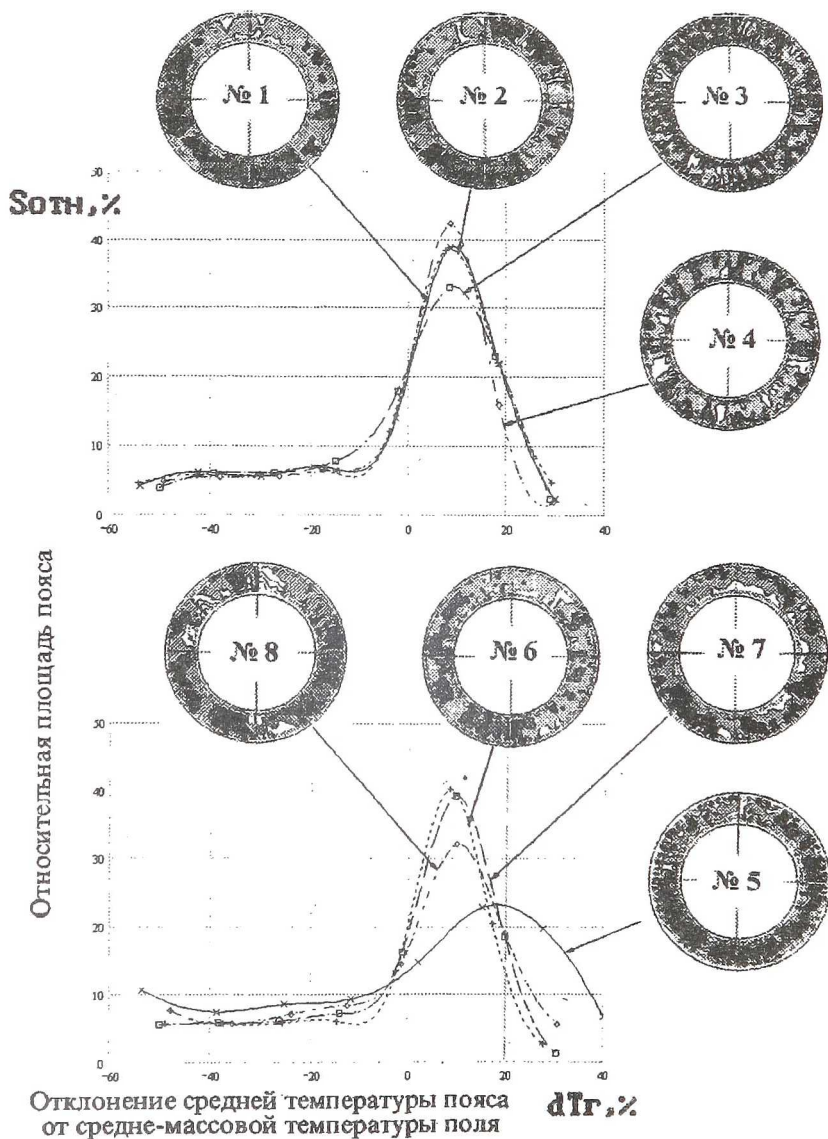


Рис. 3. Изменение относительной площади температурных поясов в общей площади потока в зависимости от отклонения температуры пояса от средней температуры по

Поле № 5 отличается от всех остальных (рис.3) тем, что у соответствующей сму КС были закрыты отверстия вторичного и смесительного воздуха по наружной стенке жаровой трубы. В результате такого эксперимента несколько большими стали относительные площади, занимаемые «холодными» температурами, так как увеличилась доля воздуха, идущего на охлаждение, а распределение для относительных площадей с «горячими» температурами сдвинулось в сторону более высоких их значений. Последнее, как следствие, связано, очевидно, с ухудшением процессов перемешивания из-за закрытия наружных отверстий.

В настоящее время продолжается анализ имеющейся информации и ведется накопление новых данных по полям температур для различных КС. Весь объем данных изучается на предмет отражения в индивидуальных особенностях полей температур порядка в расположении форсунок и воздушных отверстий в жаровой трубе и их кратности друг другу. Анализируются также данные по влиянию неравномерности полей температур на выбросы окислов азота  $\text{NO}_x$ . К сожалению, можно пока говорить лишь о предварительных результатах. В частности, по влиянию на выбросы  $\text{NO}_x$  получено следующее.

На рис.4 представлены данные по удельным выбросам  $\text{NO}_x$  в зависимости от средней локальной пиковой неравномерности  $\Delta T_{\text{Pic}}$ , осредненной для всего поля по числу и величине пиков-провалов местной температуры, и

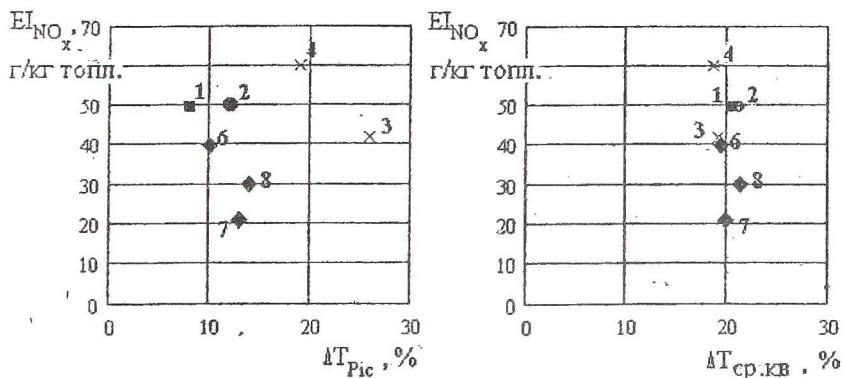


Рис. 4. Взаимосвязь удельных выбросов  $\text{NO}_x$  со средней пиковой локальной неравномерностью температурного поля  $\Delta T_{\text{Pic}}$  и среднеквадратичной неравномерностью  $\Delta T_{\text{ср.кв.}}$ , подсчитанных для всего поля:

- - ГТД № 1 (поле №1); ● - ГТД №2 (поле №2); × - ГТД №3 (поле № 3 и 4);
- ◆ - ГТД № 4 (поля № 6, 7 и 8)



от среднеквадратичной неравномерности  $\Delta T_{\text{ср.кв}}$ , подсчитанной с учетом площади температурных поясов.

Как видно из рис.4, удельные выбросы лучше коррелируют с величиной пиковой локальной неравномерности. Причем, общая тенденция такова – чем меньше уровень локальной неравномерности, тем выше оказываются выбросы  $\text{NO}_x$ . Такой результат, согласно данным из [5, 6], не должен считаться неожиданным и может получаться в тех случаях, когда коэффициенты избытка воздуха в зоне горения КС близки к единице. Если это так, то можно заключить, что для рассмотренных КС интенсификация процессов перемешивания в зоне горения, с точки зрения уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$ , нецелесообразна.

#### 4. ВЫВОДЫ

В качестве выводов можно отметить следующее.

Разработанная вычислительная программа позволяет получать достаточно обширную информацию по структуре и неравномерности поля температур, одновременно аналогичная информация выводится для любого выбранного по желанию участка – сектора, пояса и т.п.. Можно также получать информацию о любой точке температурного поля.

Представленные обобщения по общей неравномерности полей температур могут быть использованы для сравнения КС, а также в предварительных термодинамических расчетах КС и двигателей.

Полученные результаты о взаимосвязи уровней выбросов  $\text{NO}_x$  с локальной пиковой неравномерностью температурного поля являются интересными сами по себе и могут, в частности, указывать на целесообразность выбранного направления по доводке КС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Улучшение равномерности температурного поля в основной камере сгорания двигателя F100. / Кокс, Тиллер, Лестурно, Ор // Tr. ASME, Сер. Энергетические машины и установки. - 1981.-Т.103.-№4.-С.140-151.
2. Reilly R.S., Smith C.F., Dubell T.L. Исследование причин возникновения «горячих следов» в камерах сгорания и способов их уменьшения. // Новое в зарубежном авиадвигателестроении.-М.: ЦИАМ.-1982.-№10.-С.15-20.
3. Инженерные основы проектирования камер сгорания ГТД / Резник В.Е., Данильченко В.П., Болотин Н.Б., Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В. Учебное пособие.- Куйбышев: КуАИ, 1981.-80с.



4. Способ осреднения и оценка неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания ГТД / Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е., Диденко А.А., Абрашкин В.Ю.
5. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД -М.: Мир, 1986. -586с.
6. Меллор А.М. Загрязнение атмосферы газотурбинными двигателями. В кн.: Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. / Под ред. А.Н. Чигир. -М.: Машиностроение, 1981.-С.217-260.

УДК 621.5.041; 621.51

## ГИДРОДИНАМИКА КРУГОВОЙ КОНИЧЕСКОЙ ЩЕЛИ СО СКЛАДЫВАЮЩИМИСЯ СТЕНКАМИ

Докторов О.Ю., Довгялло А.И.

*Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара*

Предлагаемая к решению задача касается гидродотерь в секциях складывающегося мембранного сальфона и продолжает проблему разработки методики расчета и проектирования сальфонного микрокомпрессора с гидроприводом (результаты некоторых исследований представлены авторами в другой статье настоящего сборника).

Как следует из анализа численных значений скорости в секции  $W$ , и чисел  $Re$ , которые в среднем не превышают единицы (для частот до 600 1/мин), рассматриваемое течение относится к классу "ползущих",  $Re \leq 1$ . Поиск моделей складывающихся стенок межмембранной щели не позволил выявить готового решения, поэтому для анализа была выбрана наиболее близкая задача "...течения вязкой несжимаемой жидкости в щелевых каналах в широком диапазоне чисел Рейнольдса" [ 1].

В нашем случае складывание стенок по воздействию на поток жидкости аналогично двумерному течению несжимаемой вязкой жидкости в плоском канале между двумя проницаемыми (пористыми) пластинами, через которые осуществляется симметричный отсос или вдув.

В указанной работе [ 1] фактически удалось получить точное решение уравнений Навье-Стокса при вдувах и отсосах любой интенсивности. Отличие решенной задачи от случая межмембранной щели состоит в том, что канал рассматривается плоским и проницаемость пластин по поверхности однородна, т.е. поперечная составляющая скорости (скорость вдува) не зависит от продольной координаты.