

## **ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕЛЕНА ОХЛАДИТЕЛЯ ЗА ОТВЕРСТИЯМИ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Котляр А.А.<sup>1\*</sup>, Веретенников С.В.<sup>1</sup>, Евдокимов О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,  
г. Рыбинск, [kolesova599@gmail.com](mailto:kolesova599@gmail.com)

*Ключевые слова:* пленочное охлаждение, вихреразрешающее моделирование, отверстия сложной геометрической формы, параметр вдува.

Технология заградительного охлаждения активно используется для обеспечения необходимой температуры сопловых и рабочих лопаток первых ступеней газотурбинных двигателей (ГТД). Данный метод охлаждения требует изготовления по перу лопатки отверстий, через которые холодный воздух будет выдуваться в проточную часть турбины, при этом происходит охлаждение места вдува и расположенной за ним области [1]. Для вдува струи охладителя используются отверстия различной геометрической формы: цилиндрические, веерные отверстия с различной длиной расширяющейся части (fan-shape), скошенные (laidback) и комбинированные (веерные и скошенные) [2], антивихревые и многие другие.

Численные исследования пленочного охлаждения, как правило, выполняются с применением RANS-подходов. Однако большое количество экспериментальных исследований показывают, что за местом вдува струи охладителя формируется большое количество вихревых структур [3]. Наиболее негативное влияние на эффективность охлаждения, как показывают исследования, оказывает почкообразная вихревая структура, представляющая собой вихревую пару, вращающуюся в противоположном направлении и подмешивающая основной поток к защищаемой поверхности. RANS-моделирование не позволяет предсказать формирование мелкомасштабных вихревых структур за местом вдува. Поэтому выполнение расчетных работ, направленных на формирование пелены охладителя и ее взаимодействия с основным потоком с применением вихреразрешающего моделирования для выполнения настройки численных моделей, является важным.

В данной работе представлены результаты LES-моделирования (моделирование крупных вихрей) формирования пелены охладителя за одиночными отверстиями различной формы на плоской поверхности. Для выполнения численного исследования было построено пять геометрических моделей с различными видами отверстий для вдува охладителя. Исследование выполнялось для отверстий, которые активно применяются на практике: цилиндрическое, веерное отверстие с коротким диффузорным участком (длина расширяющейся части — 1 калибр) и длинным диффузорным участком (длина расширяющейся части — 3 калибра), скошенное отверстие (длина наклоненной части — 1 калибр), и комбинированное отверстие (веерное – 2 калибра, скошенное — 1 калибр). Угол наклона всех отверстий к стенке был равен  $\alpha=30^\circ$ .

На каждую из геометрических моделей была построена неструктурированная сетка с 7 призматическими слоями, первый пристеночный элемент равен  $1 \cdot 10^{-6}$  м и коэффициентом роста 1,2. Количество расчетных элементов для всех видов отверстий составляло  $\approx 141$  млн. На рис. 1 представлены примеры расчетных сеток.

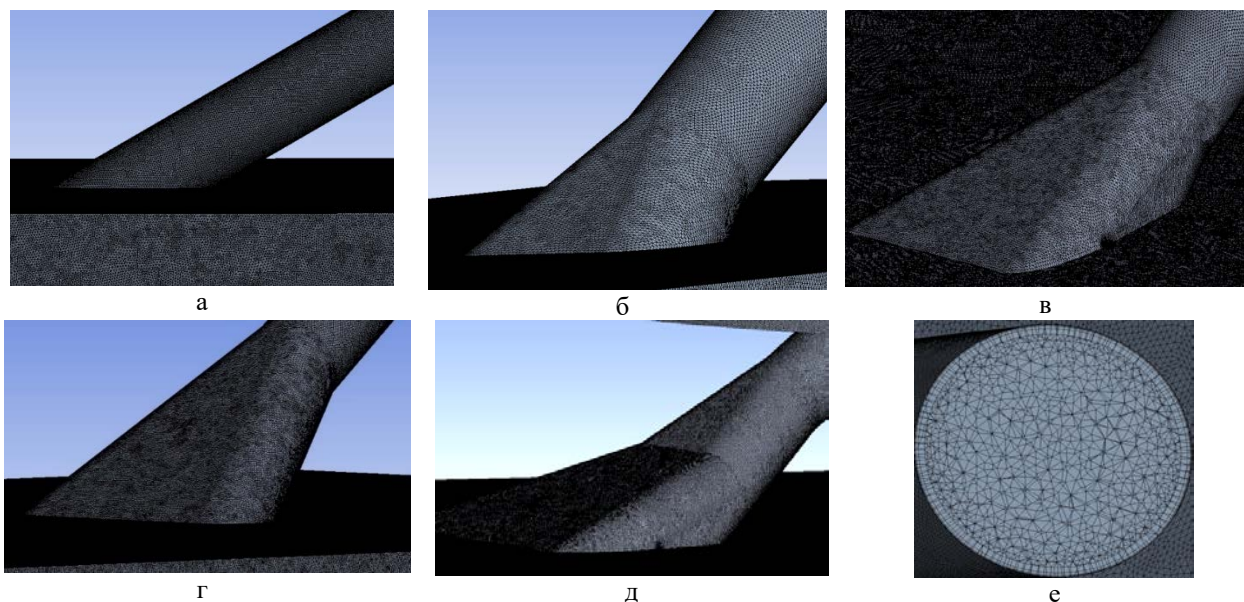


Рис.1 – Расчетная сетка: а – цилиндрическое отв., б – веерное отв. – 1D; в – скошенное отв. – 1D; г – веерное отв. – 3D; д – комбинированное отв. е – пример сетки в цилиндрической части отверстий

В качестве граничных условий на вход основного потока задавалось полное давление и температура, на вход вторичного потока (подаваемый в отверстия для пленочного охлаждения) задавалось полное давление, которое подбиралось в зависимости от параметра вдува и варьировалось от 103 до 115 кПа. Расчеты проводились при временном шаге  $t=2 \cdot 10^{-5}$  с и значении числа Куранта меньше 1. Для всех видов отверстий исследования выполнялись при изменении параметра вдува  $m$  от 0,5 до 1,5.

$$m = \frac{\rho_{\text{охл}} * V_{\text{охл}}}{\rho_{\text{г}} * V_{\text{г}}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{охл}}$ ,  $\rho_{\text{г}}$  - плотности холодного и горячего воздуха соответственно;

$V_{\text{охл}}$ ,  $V_{\text{г}}$  - скорости холодного и горячего воздуха.

По результатам численного моделирования было получено, что за отверстием цилиндрической формы, веерной формы с коротким диффузорным участком и скошенного типа формируются почкообразные вихревые структуры, которые способствуют подмешиванию основного потока к защищаемой поверхности и как следствие быстрому размытию пелены охладителя и низкой ее эффективности. За веерным отверстием с длинным диффузорным участком и комбинированного типа образуется большое количество мелкомасштабных вихревых структур, которые препятствуют проникновению основного потока под струю охладителя.

На всех исследуемых режимах за всеми формами отверстий струя охладителя имеет нестационарный характер истечения. Наименьшая интенсивность пульсаций скорости характерна для комбинированного и веерного отверстия с длинным диффузорным участком. Однако при удалении от места вдува в продольном направлении интенсивность пульсаций струи за всеми формами отверстий снижается, что обуславливается постепенным размытием струи охладителя.

Получено, что наименьший уровень тепловой защиты поверхности при всех значениях параметра вдува наблюдается за отверстием цилиндрической формы, так как при  $m \geq 1$  происходит отрыв пелены охладителя от защищаемой поверхности. (рис. 2). Эффективность скошенного отверстия с увеличением параметра вдува от 0,5 до 1 снижается на 55%, при увеличении параметра вдува до 1,5 эффективность охлаждения снижается еще на 30%. Данная закономерность характерна и для веерного отверстия с коротким диффузорным участком.

Наибольшая эффективность охлаждения при всех параметрах вдува характерна для пелены, формируемой комбинированным и веерным отверстием с длинным диффузорным участком, при параметре вдува 1,5 эффективность двух форм отверстий практически одинакова. При  $m=1$  на расстоянии 5 калибров от места вдува эффективность комбинированного отверстия на 70% выше по сравнению со скошенным отверстием.

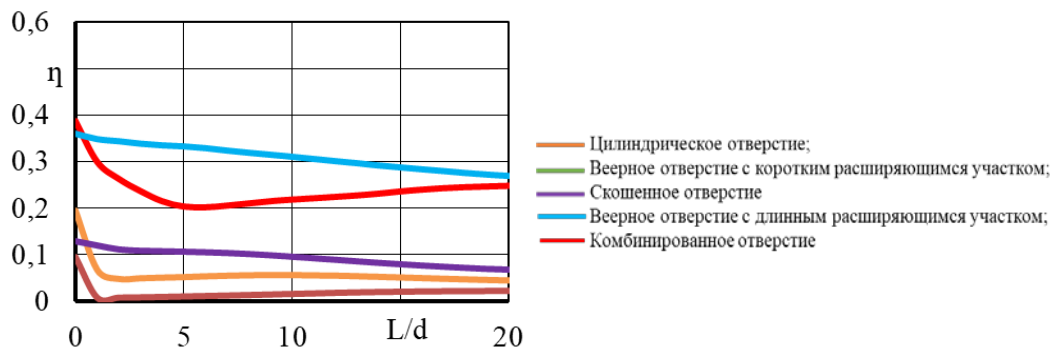


Рис. 2 – Осредненная эффективность охлаждения при  $m=1$

Таким образом, применение отверстий цилиндрической формы, веерной формы с длиной диффузорной части  $L/d=1$  калибр и скошенного типа приводит к формированию почкообразных вихревых структур, быстрому размытию пелены охладителя и как следствие, низкой эффективности тепловой защиты поверхности. Применение веерных отверстий с длиной расширяющейся части  $L/d=3$  калибра и комбинированного типа позволяет организовать надежную тепловую защиту поверхности при всех значениях параметра вдува, за счет формирования вихревых структур, которые вращаются от защищаемой поверхности и препятствуют подмешиванию основного потока к поверхности.

### Список литературы

1. Локай, В.И. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов [Текст] / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. -М.; Машиностроение, 1985,-216с.
2. Gritsch, M Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes with Expanded Exits/ Gritsch, M., Schulz, A., and Wittig, S.// Journal of Turbomachinery, 120(3), 1998b, 549-556.
3. Sgarzi, O. Analysis of vortices in three-dimensional jets introduced in a cross-flow boundary-layer. // ASME Paper 97-GT-517.

### Сведения об авторах

Котляр Анна Александровна – аспирант, ведущий инженер-конструктор ИЦ, РГАТУ имени П.А. Соловьева, [kolesova599@gmail.com](mailto:kolesova599@gmail.com).

Веретенников Сергей Владимирович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ОиТФ, РГАТУ имени П.А. Соловьева, [serveret@yandex.ru](mailto:serveret@yandex.ru).

Евдокимов Олег Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры ОиТФ, РГАТУ имени П.А. Соловьева, [yevdokimov\\_oleg@mail.ru](mailto:yevdokimov_oleg@mail.ru).

## **VORTEX-RESOLVING NUMERICAL SIMULATION OF THE FORMATION OF A COOLER SHROUD BEHIND HOLES OF COMPLEX GEOMETRIC SHAPE**

Kotlyar A.A.<sup>1\*</sup>, Veretennikov S.V.<sup>1</sup>, Evdokimov O.A.<sup>1</sup>

Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Rybinsk

[kolesova599@gmail.com](mailto:kolesova599@gmail.com)

The paper presents the results of vortex resolution modeling behind holes of complex geometric shape. It is found that kidney-shaped vortex structures are formed behind the hole of a cylindrical body, fan-shaped with an expanding section  $L/D=1$  and a beveled type, and the cooling efficiency of these types of holes is minimal. Fan holes with a long expandable section ( $L/d=3$ ) and a combined type make it possible to increase cooling efficiency and avoid mixing the main stream to the surface.