

01;03

## **О снижении эффективного сечения охлаждающей струи из-за захлестывания горячего потока в канал выдува**

© В.Г. Волков, С.О. Ширяева, В.В. Лебедев

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

E-mail: shir@uniyar.ac.ru.

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия

*Поступило в Редакцию 1 февраля 2002 г.*

Путем численного моделирования обнаружен и исследован эффект захлестывания горячего потока внутрь канала конечной глубины, по которому подается охладитель. Обнаруженный эффект приводит к уменьшению сечения потока охлаждения, увеличению его скорости и снижению эффективности пристенной газовой завесы.

1. На примере плоской задачи методами численного моделирования получены данные о характере течения и процессах теплообмена, имеющих место при истечении затопленных холодных струй в горячий основной поток сквозь отверстия конечной глубины. Выявлено, что отрывной характер течения приводит к попаданию в канал отверстия горячей внешней среды. Этот феномен влияет на формирование газовой завесы вниз по течению от отверстия. Ранее он был обнаружен экспериментально для каналов с диаметрами, на порядок большими, чем используются для создания газовых завес [1]. Экспериментальное исследование возможности реализации такого феномена в узких (с диаметрами, меньшими одного сантиметра) каналах весьма затруднительно по условиям проведения экспериментов. В этой связи численное моделирование феномена весьма актуально. При численном же моделировании истечения струи из канала важным представляется правильное задание граничных условий на дне канала, так как от него сильно зависят результаты моделирования [2]. Толщина стенок охлаждаемых лопаток газовых турбин такова, что длина каналов, сквозь которые охлаждающий воздух поступает в пристенную часть основного горячего потока, где он образует газовую завесу, не превышает

2–6 диаметров канала. Течение охладителя сквозь такое отверстие имеет отрывной характер, а истекающая струя не заполняет выходного сечения отверстия [3], что и определяет особенности задания граничных условий.

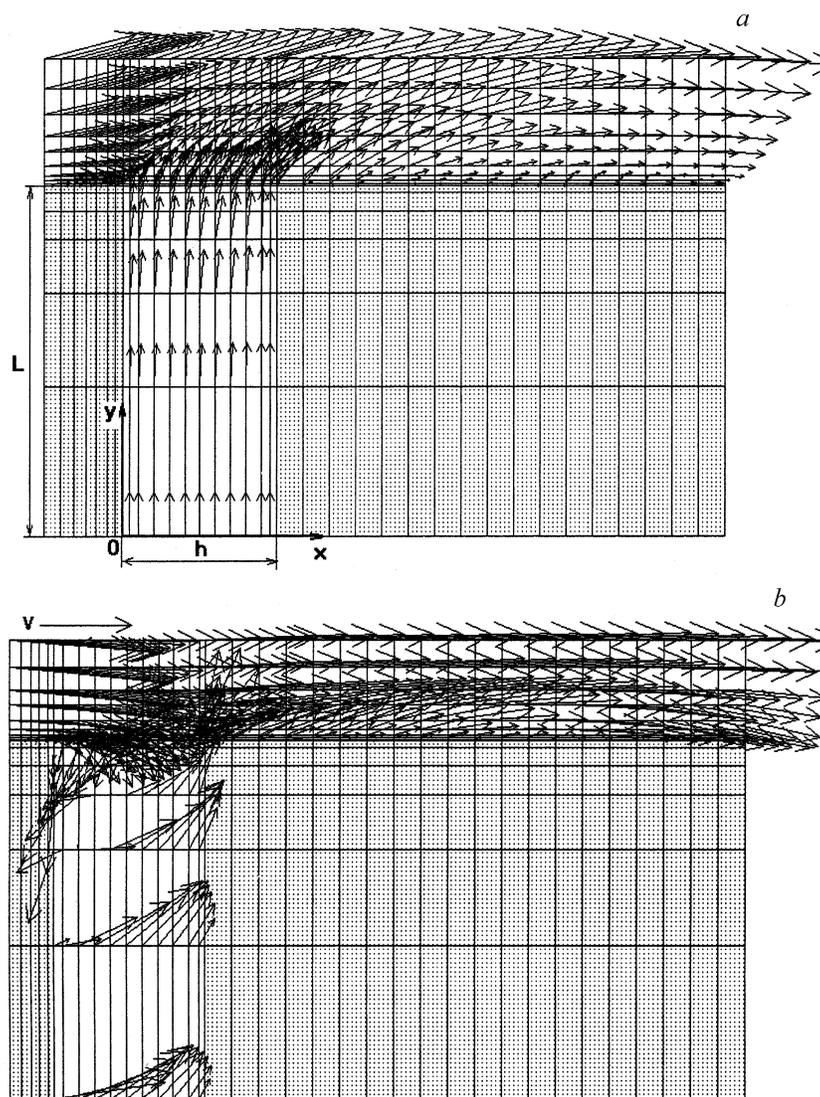
В работе [4] выявлены возможные режимы истечения из неограниченного потока, протекающего под стенкой, сквозь поперечную щель с острыми кромками конечной глубины (в дальнейшем называем отверстием) в пространство над стенкой в зависимости от отношения скорости невозмущенного потока охладителя под стенкой к скорости струи на выходе из отверстия. При этом расходные характеристики отверстия могут существенно изменяться. Результаты получены с применением аппарата теории функции комплексного переменного применительно к плоскому потенциальному несжимаемому течению. В связи с этим представляет интерес исследование влияния характера течения в отверстии на формирование пристенной газовой завесы ниже по потоку от места вдува охладителя. В полной постановке задача о моделировании истечения затопленной струи сквозь отверстие конечной глубины в твердой стенке из потока, протекающего под стенкой, в вязкий внешний сжимаемый турбулентный поток до сих пор не решена.

2. Будем решать задачу о формировании газовой завесы при истечении охладителя в основной поток под углом  $90^\circ$  к стенке из щелевого отверстия, имеющего ширину  $h$  и глубину  $L$ , математическая формулировка которой приведена в [4] и состоит из полной системы уравнений Навье–Стокса с необходимыми граничными условиями (см. [2,5,6]). Неоднородные граничные условия по скорости для истекающей струи зададим на входе в канал отверстия в двух вариантах: в виде однородного распределения скорости аналогично случаям, рассмотренным в [2], и в виде неоднородного распределения скорости, когда истечение происходит из потока сквозь отверстие в боковой стенке с относительной глубиной  $L/h = 2$ . Граничные условия определим для режима безударного (без образования зон рециркуляции) втекания охладителя в отверстие. Для этого воспользуемся комплексным потенциалом течения, полученным в [4], с помощью которого определяются проекции скорости  $U$  и  $V$  на оси  $X$  и  $Y$  при  $Y = 0$ , т.е. на входе в отверстие. Для расчета использована программа, построенная на решении осредненных по Рейнольдсу полных уравнений Навье–Стокса, описанная в [5,6]. Там же приведены граничные условия для основного

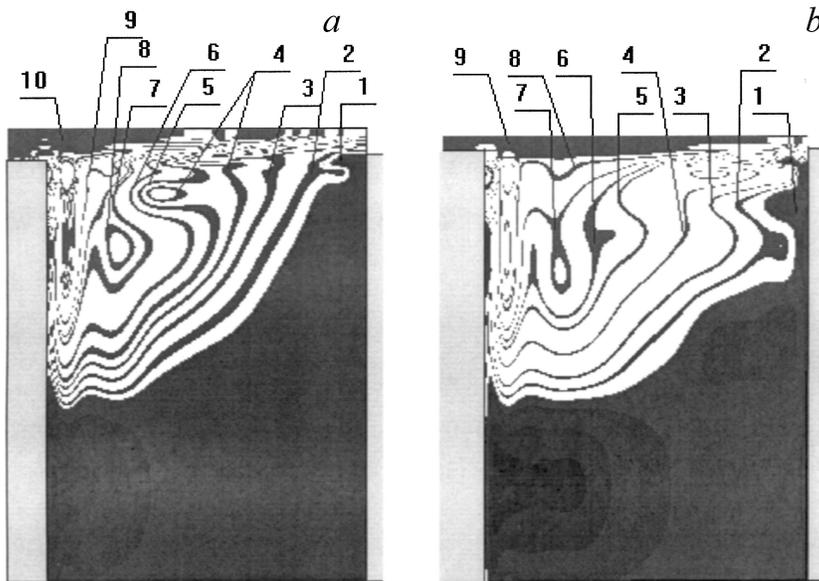
потока. На стенках выдерживались условия адиабатности ( $\partial T/\partial n = 0$ ). Решения получены для числа Маха горячего основного потока на входе в расчетную область  $M_0 = 0.3$ , числа Рейнольдса  $Re$ , определенного по скорости основного потока и ширине щели  $h$ , равного 3300. Режимы расчетов определялись параметром вдува  $m = 0.5; 1$ . Параметры вдува  $m$  (отношение плотностей тока охладителя на выходе из отверстия и горячего основного потока на входе в расчетную область) определялись по расходной скорости охладителя. Массовая плотность и скорость горячего потока на входе в расчетную область принимались равными единице. Отношение исходных температур холодного и горячего потоков равнялось 0.5. Решения получены в безразмерном виде.

Использованная процедура численного моделирования основана на разностной схеме, полученной с использованием стандартных методов: контрольных объемов, масштабирования сжимаемости, расщепления. Задача решалась на основе метода установления, использующего векторные прогонки. Разностная схема обладала вторым порядком точности по пространственной переменной и первым порядком точности по временной. Задача решалась на неравномерной сетке с числом узлов по осям координат: 36 вдоль оси  $OX$ , 38 вдоль оси  $OZ$ , 88 вдоль оси  $OY$ . Полное число узлов — 120 400. Минимальное значение пространственного шага использовалось у твердой стенки (для адекватного описания пограничного слоя) —  $dZ = 0.00095$ , максимальное в периферийных областях (верхняя и выходная грани расчетной области) —  $dY = 0.1$ . Внутри расчетной области, в местах интенсивного изменения параметров, сетка локально сгущалась.

Результаты расчетов течения для параметров вдува  $m = 1$  в виде фрагментов полей скорости представлены на рис. 1 для обоих видов профиля скоростей на входе в отверстие. Из рис. 1 видно, что характерной особенностью поля скорости при истечении сквозь отверстие в боковой стенке, для неравномерного профиля на входе в отверстие, является захлестывание основного горячего потока в глубь отверстия и образование внутри него циркуляционного течения. Это приводит к сужению реального сечения струи. Вследствие сохранения массового расхода (в силу граничных условий на входе в отверстие) скорость струи на выходе из отверстия возрастает. Уже в отверстии идут процессы конвективного теплообмена между холодным и горя-



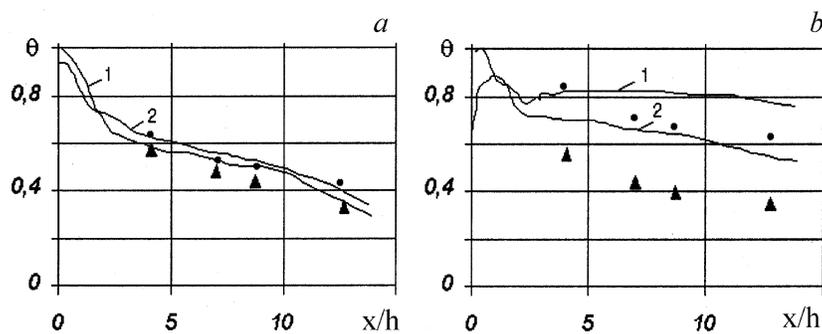
**Рис. 1.** Поля скоростей при задании однородного (*a*) и неоднородного (*b*) профилей скорости на входе в щелевой канал для  $m = 1$ .



**Рис. 2.** Поле температуры в щели при отрывном характере течения: *a* —  $m = 0.5$ : 1 —  $T = 0.5$ ; 2 — 0.53; 3 — 0.55; 4 — 0.59; 5 — 0.61; 6 — 0.66; 7 — 0.77; 8 — 0.8; 9 — 0.85; 10 — 1; *b* —  $m = 1$ : 1 —  $T = 0.5$ ; 2 — 0.55; 3 — 0.59; 4 — 0.69; 5 — 0.78; 6 — 0.82; 7 — 0.88; 8 — 0.97; 9 — 1.

чим потоками. Это является следствием отрывного характера течения в канале отверстия. Аналогичная картина течения наблюдается для  $m = 0.5$ .

На рис. 2 в виде изотерм представлены поля температуры в отверстии для  $m = 0.5$  и  $m = 1$  при неравномерном профиле на входе в отверстие. Наличие изотерм с температурами, большими 0.5, свидетельствует о процессе смешения холодного потока с попадающим в отверстие в левой верхней его части горячим потоком. Видно, что повышение параметра вдува  $m$  от 0.5 до 1 приводит к увеличению массы горячей среды, попадающей в канал, и к интенсификации теплообмена. Об этом свидетельствуют увеличение области с температурой, большей 0.5, и повышение уровней температур.



**Рис. 3.** Зависимость эффективности завесного охлаждения  $\theta$  за щелью ( $x$  — длина участка пластины за щелью, а  $h$  — ширина щели): расчет для „тонкого“ пограничного слоя: 1 — однородные граничные условия, 2 — неоднородные граничные условия. Экспериментальные данные: ● — для „тонкого“ пограничного слоя, ▲ — для „толстого“ пограничного слоя.  $a$  —  $m = 0.5$ ,  $b$  —  $m = 1$ .

3. Под эффективностью завесного охлаждения  $\theta$  принимается относительная температура адиабатной стенки, определяемая по формуле:

$$\theta = \frac{T_h - T_w}{T_h - T_c},$$

где  $T_h$ ,  $T_c$ ,  $T_w$  — начальные температуры горячего и холодного потоков и адиабатной стенки соответственно. На рис. 3 представлены распределения эффективности завесного охлаждения  $\theta$  для рассмотренных выше течений. Из рис. 3 видно, что для обоих значений параметра вдува в случае отрывного течения в отверстии (кривая 2) начальная эффективность завесы  $\theta$  ниже, чем при безотрывном. Это вызвано повышением температуры охладителя еще в отверстии при его смешении с горячим потоком, а также уходом струи охладителя от стенки в глубь основного потока из-за возрастания скорости его истечения при том же массовом расходе. С этим связана немонотонность зависимости, представленной кривой 2 при  $m = 1$ . Следует отметить, что при  $m = 0.5$  результаты расчетов для различных способов задания граничных условий близки друг к другу, так как возмущения в потоке, вызванные вдувом, быстро

исчезают ниже по течению. Но для  $m = 1$  результаты существенно отличны, что связано с различной динамикой взаимодействия струй с основным горячим потоком. На рис. 3 приведены экспериментальные точки, полученные авторами на плоской пластине (для чисел  $Re = 1800$ ,  $M_0 = 0.056$ ) при вдуве через вертикальную щель для „толстого“ пограничного слоя перед струей (пограничный слой развивается на участке пластины перед щелью на длине  $x/h = 30$ , где  $x$  — длина участка пластины до щели, а  $h$  — ширина щели) и для „тонкого“ пограничного слоя ( $x/h = 3-4$ ) по данным [7]. В расчете реализовался случай „тонкого“ пограничного слоя ( $x/h = 3.5$ ). Под „толстым“ пограничным слоем понимается слой, толщина которого сопоставима или превышает ширину щели  $h$ . Известно, что пограничный слой сильно влияет на формирование пристенной газовой завесы и ее эффективность и это влияние растет с ростом параметра вдува [6]. Из рис. 3 видно, что для  $m = 0.5$  наблюдается удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных для обоих видов граничных условий и тонких и толстых пограничных слоев (смотри экспериментальные точки). Для  $m = 1$  расчетные данные, полученные для неоднородных граничных условий по скорости на входе в отверстие (кривая 2), удовлетворительно согласуются с данными экспериментов для „тонкого“ пограничного слоя на пластине. Кроме того, эти расчетные данные правильно отражают ход зависимости эффективности завесы  $\theta$  от координаты  $x/h$ , т.е. располагаются эквидистантно экспериментальным данным.

4. Заключение. При моделировании процессов истечения охлаждающего газа сквозь отверстия конечной глубины в стенке в поперечный поток, омывающий стенку, и формирования пристенной газовой завесы за местом вдува, необходимо учитывать отрывной характер течения охладителя в канале отверстия. Для этого необходимо правильно задавать граничные условия на входе в отверстие либо, если они не известны, расширить расчетную область таким образом, чтобы узлы расчетной сетки на входе в отверстие оказались внутренними, а границы области вынесены туда, где граничные условия либо известны, либо могут быть заданы приблизительно.

## Список литературы

- [1] *Goldstein R.J., Jin P., Olson R.L.* // ASME. Journal of Turbomachinery. 1999. V. 121. P. 225–232.
- [2] *Волков В.Г., Лебедев В.В.* // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. Труды XIII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. С.-Петербург, 2001. Т. 1. С. 61–64.
- [3] *Friedrichs S., Hodson H.P., Daves W.N.* // Journal of turbomachinery. 1997. V. 119. P. 786–793.
- [4] *Богомолов Е.Н.* // Прикладная механика. 1968. Т. 4. № 10. С. 105–112.
- [5] *Волков В.Г., Лебедев В.В., Ширяева С.О.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 2. С. 67–73.
- [6] *Волков В.Г., Лебедев В.В., Ширяева С.О.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 4. С. 87–94.
- [7] *Кортиков Н.Н., Смирнов Ю.А.* // ИФЖ. 1983. Т. 48. № 5. С. 715–719.