

УДК 621.438

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-19-26

## Повышение аэродинамической эффективности широкоугольных плоских диффузоров

С.С. Дмитриев, С.М.С.О. Мохамед, А.В. Барбашин

В современных парогазовых установках при проектировании переходных патрубков от выходного диффузора газовой турбины к котлу-утилизатору требования компактности в ряде случаев являются определяющими, что приводит к использованию неоптимальных с точки зрения аэродинамики каналов, в том числе широкоугольных диффузоров, в которых реализуется течение с отрывом потока и резко неравномерным выходным полем скоростей. Подобный характер течения после переходного патрубка на входе в котел-утилизатор значительно ухудшает процесс теплообмена в первых по ходу трубных пучках котла.

Среди аэродинамических методов воздействия на течение в диффузорах большой интерес представляют методы, позволяющие без дополнительных затрат энергии существенно повысить их эффективность. Широко распространен метод затягивания отрыва потока *delaying flow separation* при установке так называемых генераторов вихрей, представляющих собой плоские или профилированные пластины, устанавливаемые непосредственно на стенке диффузорного канала перпендикулярно к ней. При обтекании пластин вблизи стенки образуются вихри, увеличивающие интенсивность турбулентного обмена в пограничном слое и его устойчивость к отрыву. Приведены результаты экспериментального исследования способа снижения потерь энергии и выравнивания выходного поля скоростей в широкоугольных диффузорных каналах при помощи установки во входном сечении канала короткой пластины параллельно отклоняющейся стенке. При данной установке пластина является не только генератором вихрей, переносящих дополнительную энергию в пограничный слой, но и передает к стенке дополнительное количество движения за счет отклонения потока. Исследования проводили на аэродинамической трубе открытого типа при значениях безразмерной скорости на входе в диффузор не превышающих 0,3. Получены значения коэффициентов полных потерь энергии при перемещении пластины как вдоль, так и перпендикулярно отклоняющейся стенке диффузорного канала. Определено оптимальное местоположение пластины во входном сечении канала с точки зрения наибольшего снижения потерь энергии. Для отрывных и безотрывных режимов течения получены распределения скоростей в выходном сечении диффузора.

Показано, что в случае реализации отрывных режимов в диффузоре установка пластины позволяет существенно снизить суммарные потери энергии, увеличить диффузорный эффект и выровнять поле скоростей в выходном сечении канала за счет частичной или полной ликвидации отрыва потока.

При проведении экспериментов измеряли пульсации статического давления на отклоняющейся стенке в пяти сечениях по ее длине. Доказано, что для отрывных режимов при установке пластины во входном сечении уменьшается интенсивность пристеночного пульсационного движения, а, значит, и динамические нагрузки на стенки канала.

Полученные результаты позволяют рекомендовать исследованный способ управления течением в широкоугольном диффузоре для реализации в переходных патрубках от газовой турбины к котлу-утилизатору парогазовой установки при их модернизациях и ремонтах для выравнивания поля скоростей на входе в котел-утилизатор и снижения потерь энергии и динамических нагрузок.

*Ключевые слова:* отрыв потока, потери энергии, поле скоростей, пульсации давления, управление течением, диффузор.

*Для цитирования:* Дмитриев С.С., Мохамед С.М.С.О., Барбашин А.В. Повышение аэродинамической эффективности широкоугольных плоских диффузоров // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 19—26. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-19-26.

## Improving the Aerodynamic Performance of Wide-Angle Flat Diffusers

S.S. Dmitriev, S.M.S.O. Mokhamed, A.V. Barbashin

In designing the transition pipes from the gas turbine output diffuser to the heat-recovery steam generator used in modern combined-cycle power plants, the compactness requirements are in some cases the governing ones. As a result, channels having non-optimal aerodynamics are used, including those in the form of wide-angle diffusers, the current in which may contain zones with flow separation and a sharply non-uniform field of outlet velocities. Such a flow pattern downstream of the transition pipe at the heat-recovery steam generator inlet significantly impairs the heat transfer in the steam generator's tube bundles located first along the flow.

Among the aerodynamic methods used to modify the flow pattern in diffusers, methods that allow their performance to be improved significantly without additional energy expenditures are of great interest. A flow separation delaying method involving the use of so-called vortex generators has received wide use. These vortex generators are made in the form of flat or profiled plates installed directly on the diffuser channel wall perpendicular to it. As the current flows over the plates, near-wall vortices are generated, which intensify turbulent heat transfer in the boundary layer and make this layer more resistant to separation.

The article presents the results from an experimental study of the method for reducing energy losses and equalizing the field of outlet velocities in wide-angle diffuser channels by installing a short plate in the channel inlet section in parallel to the deflected wall. With such an arrangement, the plate is not only a generator of vortices that transfer additional energy to the boundary layer, but also transmits an additional momentum to the wall due to flow deflection.

The investigations were carried out in an open-type wind tunnel with the dimensionless velocity values at the diffuser inlet not exceeding 0.3. The values of total energy loss coefficients were obtained in moving the plate both along and perpendicular to the diffuser channel deflecting wall. The plate optimal location in the channel inlet section in terms of the greatest reduction of energy losses has been determined. The velocity distribution patterns in the diffuser outlet section for regimes with and without flow separation have been obtained.

It is shown that in the case of separation flow modes in the diffuser, the use of a plate installed in it can significantly reduce the total energy loss, increase the diffuser effect, and equalize the velocity field in the channel outlet section of due to partial or complete elimination of flow separation. During the experiments, static pressure pulsations on the deflected wall were measured in five sections along its length. It is shown that in case of separation flow modes, the plate installed in the inlet section decreases the intensity of the near-wall pulsating motion and, hence, the dynamic loads on the channel walls.

The obtained results allow us to recommend the investigated flow control method in a wide-angle diffuser for being used in the transition pipes from the gas turbine to the combined cycle plant's heat-recovery steam generator in the course of their modernizations and repairs to equalize the velocity field at the heat-recovery steam generator inlet, to decrease the energy losses, and to reduce the dynamic loads.

*Key words:* flow separation, energy loss, velocity field, pressure pulsations, flow control, diffuser.

*For citation:* Dmitriev S.S., Mokhamed S.M.S.O., Barbashin A.V. Improving the Aerodynamic Performance of Wide-Angle Flat Diffusers. MPEI Vestnik. 2018;6:19—26. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-19-26.

Многочисленные исследования течений в диффузорах однозначно показывают, что для обеспечения максимального восстановления давления необходимо создать безотрывное течение на максимально возможной длине отклоняющихся стенок [1, 2].

Эта задача частично решается соответствующим профилированием каналов [3], однако в ряде случаев граничные условия конструирования не позволяют использовать этот способ. В результате приходится применять методы аэродинамического воздействия на поток: отсос пограничного слоя или тангенциальный вдув. Следует отметить, что и сечение отсоса пограничного слоя, и сечение вдува обязательно должны располагаться выше по потоку от места возникновения отрыва, и целесообразным представляется устройство отсоса и вдува в пограничный слой в непосредственной близости от входного сечения в диффузор [4], поскольку на этапе проектирования местоположение отрыва можно предсказать только приближительно. Кроме того, применение отсоса пограничного слоя и вдува требует внесения изменений в конструкцию технического устройства, включающего диффузор, а также дополнительных затрат энергии, что существенно ограничивает применение данных методов.

Среди аэродинамических методов воздействия на течение в диффузорах, описанных в [1, 2, 5], большой интерес представляют методы, позволяющие без дополнительных затрат энергии существенно повысить их эффективность за счет установки в пограничном слое для интенсификации турбулентного обмена так называемых генераторов вихрей, способствующих затягиванию отрыва вниз по потоку. Исходя из количества публикаций на эту тему, интерес к данному методу обеспечения безотрывного течения не ослабевает [6—15].

Генераторы вихрей представляют собой систему плоских или крыловидных пластин, устанавливаемых на стенке канала и определенным образом ориентированных в потоке. Позади каждой пластины при ее обтекании образуются вихри, которые при взаимодействии с основным потоком увеличивают интенсивность

турбулентного обмена в пограничном слое и, соответственно, его устойчивость к отрыву.

Добавочные поверхности, введенные в поток, увеличивают гидравлические потери, но если при их помощи удастся добиться ликвидации отрыва пограничного слоя, то суммарный эффект может привести к такому снижению потерь, которое делает их использование вполне оправданным.

Особенность применяемых генераторов вихрей заключается в том, что пластины устанавливаются непосредственно на стенке перпендикулярно к ней [6—15]. Влияние установки пластины параллельно отклоняющейся стенке плоского несимметричного диффузора с углом раскрытия  $18^\circ$  описано в [16]. С ее помощью удалось обеспечить безотрывное течение на всей длине отклоняющейся стенки. Однако в данном случае была использована достаточно длинная пластина (длина составляла  $1/3$  от длины всей отклоняющейся стенки), и положительного эффекта удалось добиться в основном за счет ускорения пристеночных слоев, движущихся в пограничном слое у отклоняющейся стенки за счет организации канала постоянного сечения вблизи отклоняющейся стенки под пластиной.

Исследовано влияние установки короткой пластины параллельно отклоняющейся стенке диффузора во входном сечении диффузора. В этом случае пластина является не только генератором вихрей, сходящих с ее передней кромки при больших углах атаки и способствующих переносу импульса к стенке. При натекании на нижнюю часть пластины поток отклоняется и получает дополнительный импульс к стенке канала, что также должно увеличить устойчивость пограничного слоя к отрыву.

Схема установки пластины приведена на рис. 1. Длина пластины — 10 мм, толщина — 1 мм, ширина равна ширине канала и составляет 57 мм. Пластина крепится на конце штанги и при помощи специального координатного устройства может перемещаться как вдоль стенки в направлении  $x$ , так и перпендикулярно к ней по  $y$ .

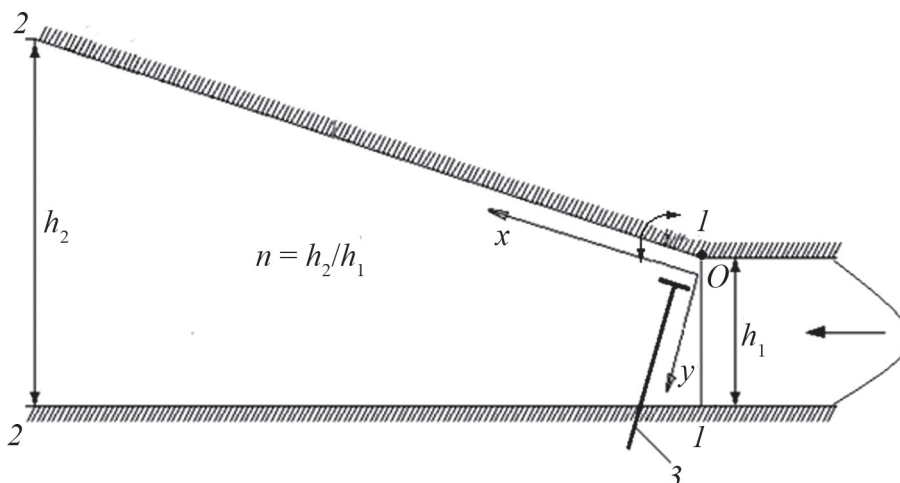


Рис. 1. Схема установки пластины на входе в диффузорный канал:

1–1, 2–2 — входное и выходное сечения диффузорного канала; 3 — штанга для крепления и перемещения пластины

Диффузорный канал выполнен несимметрично для локализации отрыва потока в случае его возникновения только на отклоняющейся стенке. Расстояние между боковыми параллельными стенками и высота входного сечения диффузорного канала  $h_1$  — 57 мм. Отклоняющаяся стенка длиной 270 мм обладает шарнирным соединением по радиусу 10 мм со стенкой предвключенного канала в точке  $O$ , что позволяет менять степень расширения диффузорного канала  $n = h_2/h_1$  от 1,0 до 4,0 и соответствует углу отклонения стенки от 0 до 40°.

Изменения степени расширения и угла отклонения стенки в диффузорном канале оказывают независимое влияние [1]. В принятой конструкции модели данные величины однозначно связаны, что позволяет в качестве единственного параметра использовать степень расширения канала  $n$ , легко измеряемую при проведении экспериментов. Кроме того подобная модель реализует для сравнения различные режимы течения, как с отрывом, так и безотрывные, на одной и той же стенке.

Для оценки аэродинамической эффективности использован коэффициент полных потерь  $\zeta_n$ , определяемый в соответствии с методикой [1] через измеренные давление полного торможения  $p_{01}$ , статическое давление  $p_1$  на входе в диффузорный канал в сечении 1–1 и давление  $p_2$  на выходе из диффузорного канала в сечении 2–2:

$$\zeta_n = \frac{1 - (p_2/p_{01})^{k-1/k}}{1 - (p_1/p_{01})^{k-1/k}}.$$

Для оценки эффективности диффузорных каналов используются также коэффициенты восстановления давления  $\xi$  и полезного действия диффузора  $\eta_d$  [1].

Коэффициенты полных потерь  $\zeta_n$  и восстановления давления  $\xi$  связаны однозначной зависимостью из [1]:

$$\zeta_n = 1 - \xi.$$

Минимум коэффициента полных потерь  $\zeta_n$  соответствует максимуму коэффициента восстановления давления  $\xi$ .

Коэффициент полезного действия диффузора  $\eta_d$  учитывает только внутренние потери энергии. Таким образом, данные по коэффициенту полных потерь  $\zeta_n$ , учитывающему как внутренние потери, так и потери с выходной скоростью, наиболее полно характеризуют процесс в диффузорном канале.

Давление полного торможения  $p_{01}$  равно давлению во входном ресивере, на котором установлена исследуемая модель, а давление  $p_2$  на выходе из диффузорного канала одинаково с атмосферным давлением. Среднее статическое давление  $p_1$  на входе в исследуемый диффузорный канал определяли по показаниям шести дренажей, расположенных по периметру входного сечения. В качестве рабочей среды использовали сжатый воздух от турбовоздуходувки ТВ-42-1,4.

На рис. 2 изображена зависимость коэффициента полных потерь  $\zeta_n$  от степени расширения канала  $n$  при  $\varepsilon_2 = 0,955$  ( $\varepsilon_2 = p_2/p_{01}$  — отношение давлений, которое в этой серии поддерживалось постоянным для разных значений  $n$ ).

Измерения скорости в пограничном слое вдоль отклоняющейся стенки показали, что в диапазоне  $n = h_2/h_1 = 1,0 \dots 2,0$  в диффузоре реализовывался безотрывный режим течения. При  $n > 2,0$  на отклоняющейся стенке (сначала вблизи выхода из канала, а по мере увеличения  $n$  все ближе к входному сечению) фиксировался отрыв потока.

Режим при  $n = 2,0$  соответствовал режиму максимальной эффективности диффузора, значение  $\zeta_n$  для этой степени расширения канала — минимально. С ростом  $n > 2,0$  значение  $\zeta_n$ , как следует из рис. 2, возрастает, а при  $n > 3,4$  показатель  $\zeta_n$  становится практически постоянным и равным значению  $\zeta_n$  для безградиентного течения при  $n = 1,0$ , что свидетельствует о

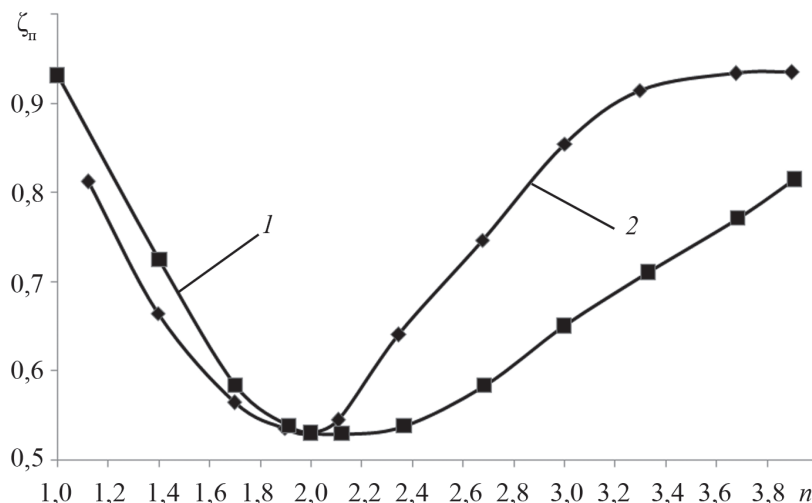


Рис. 2. Зависимость коэффициента полных потерь  $\zeta_n$  от степени расширения канала  $n$  при  $\epsilon_2 = 0,955$  без установки пластины (2) и с пластиной, установленной при  $x = 0$  мм и  $y = 10$  мм (1)

переходе к струйному режиму течения в исследованном канале с отрывом потока непосредственно во входном сечении.

На рис. 3 представлено изменение коэффициента полных потерь  $\zeta_n$  при установке пластины на различных расстояниях  $x$  и  $y$ . Из данных рис. 3 следует, что при установке пластины непосредственно на отклоняющейся стенке при  $y = 0$  коэффициент полных потерь практически неизменен при разных значениях  $x$  и равен значению  $\zeta_n$  без пластины. По мере удаления пластины от стенки с ростом координаты  $y$  коэффициент полных потерь сначала уменьшается до некоторого значения, а затем увеличивается, причем максимальное снижение коэффициента полных потерь до  $\zeta_n = 0,6$  достигается при установке пластины при  $y = 10$  мм и  $x = 0$  мм.

При установке пластины на расстоянии от стенки  $y > 15$  мм значения  $\zeta_n$  становятся практически одинаковыми для всех  $x$ . При расположении пластины на расстоянии  $y$  в диапазоне  $35 < y < 60$  мм значения не меняются и составляют порядка 0,73, что на 7% меньше, чем для канала без пластины для этой степени расширения.

Таким образом, оптимальное местоположение пластины в канале с точки зрения максимального снижения потерь энергии соответствует положению пластины при  $x = 0$  мм и  $y = 10$  мм. При этих значениях координат  $x, y$  проведены измерения коэффициента полных потерь во всем диапазоне изменения степени расширения канала. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Установка пластины при безотрывных режимах течения для  $n = 1,0...2,0$  увеличивает суммарные потери

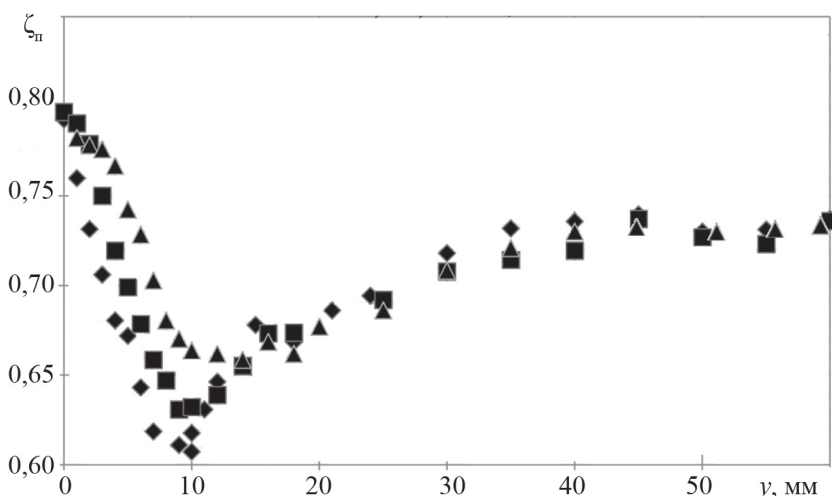


Рис. 3. Изменение коэффициента полных потерь при установке пластины параллельно отклоняющейся стенке для разных значений координат  $x$  и  $y$ :

$x$  — расстояние от входной кромки пластины до сечения I-I,  $x = 0$  (◆), 10 (■), 20 (▲) мм;  $y$  — расстояние пластины от отклоняющейся стенки;  $n$  — степень расширения канала,  $n = 2,8$ ;  $\zeta_n$  — коэффициент полных потерь без установки пластины,  $\zeta_n = 0,8$ .

энергии в канале приблизительно на 5%. В этом диапазоне изменения  $n$  суммарные потери энергии определяются трением в пограничных слоях на стенке канала и потерями с выходной скоростью. С ростом  $n$  от 1,0 до 2,0 потери на трение в пограничных слоях остаются практически неизменными, но существенно уменьшаются потери с выходной скоростью.

Увеличение суммарных потерь энергии в канале при установке пластины можно объяснить увеличением гидравлического сопротивления при установке непосредственно на входе в канал дополнительной обтекаемой поверхности. Однако для отрывных режимов течения при  $n > 2,0$  картина противоположная. В этом диапазоне изменения  $n$  установка пластины приводит к снижению коэффициента полных потерь в среднем на 20%. Очевидно, что такое значительное снижение потерь энергии возможно только за счет частичного или полного устранения отрывных зон в канале.

Для проверки этого при степени расширения  $n = 2,5$  проведено траверсирование поля скоростей на выходе из канала. Выполнены измерения с пластиной, установленной при  $x = 0$  мм и  $y = 10$  мм, и без установки пластины в канале. Результаты показаны на рис. 4.

Линии равной скорости в выходном сечении построены для относительных безразмерных скоростей  $\lambda_{отн} = \lambda_i/\lambda_1$ , где  $\lambda_i$  — значение безразмерной скорости в некоторой  $i$ -ой точке выходного сечения;  $\lambda_1$  — средняя безразмерная скорость в сечении  $l-l$ .

Вблизи отклоняющейся стенки в выходном сечении имеется застойная зона, занимающая порядка 30% выходного сечения (рис. 4, б). Максимальное значение относительной скорости в выходном сечении составляет 90% от значения входной скорости.

При установке пластины (рис. 4, а), застойная зона у отклоняющейся стенки в выходном сечении суще-

ственно уменьшается и смещается к отклоняющейся стенке. При этом она занимает уже менее 10% площади выходного сечения. Максимальная скорость потока снижается и составляет порядка 70% от входной скорости, а поле скоростей становится значительно более равномерным, т. е. диффузорный эффект при той же степени расширения по сравнению с исходным вариантом увеличивается.

На отклоняющейся стенке в пяти точках вдоль ее средней линии заподлицо со стенкой установлены датчики пульсаций давления. На рисунке 5 продемонстрировано, как вдоль отклоняющейся стенки меняется величина среднеквадратичного значения амплитуд пульсаций давления  $\langle p \rangle$ , характеризующая энергию пульсационного движения потока, отнесенная к разности давлений  $p_{01}$  и  $p_2$ . Величина  $\epsilon_2 = p_2/p_{01}$  в настоящей серии экспериментов постоянна и равна 0,943 для обоих исследованных случаев: с исходным каналом без пластины и с установкой пластины параллельно отклоняющейся стенке при  $x = 0$  мм и  $y = 10$  мм. Степень расширения канала  $n = 2,5$ . Максимальная интенсивность пульсаций давления без установки пластины в канале присутствует в начале отклоняющейся стенки на расстоянии 33 мм от входного сечения  $l-l$ .

Значение величины  $\langle p \rangle / (p_{01} - p_2)$  составляет порядка 15% от перепада давлений на канал. На расстоянии 250 мм от входного сечения она заметно уменьшается до показателя в 7% от перепада давлений. Связано это с тем, что именно в области перехода к диффузорному течению имеет место максимальное значение положительного градиента давления. В месте перехода к диффузорному участку течения в канале заметно меняется входное распределение скоростей в поперечном направлении, и у отклоняющейся стенки наблюдается ускорение потока [1]. Это приводит к увеличению ло-

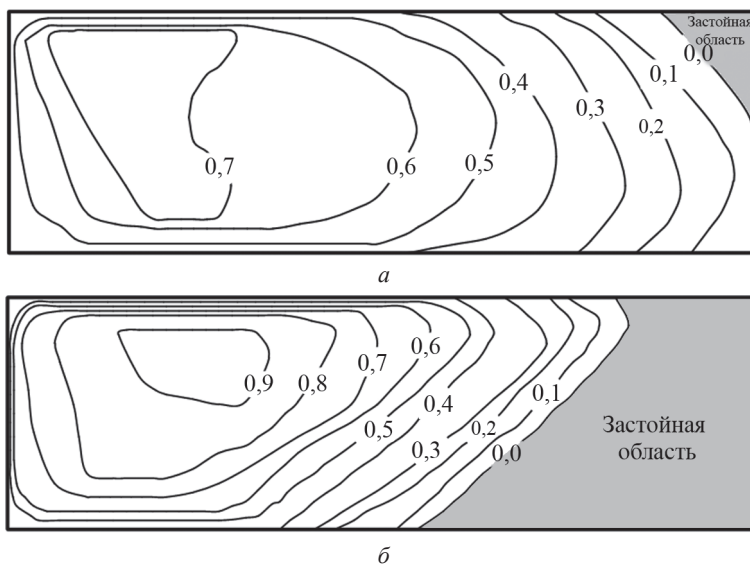


Рис. 4. Выходное поле скоростей при степени расширения 2,5 и средней скорости на входе в диффузорный участок  $\lambda_1 = 0,35$  с пластиной (а) и без нее (б)

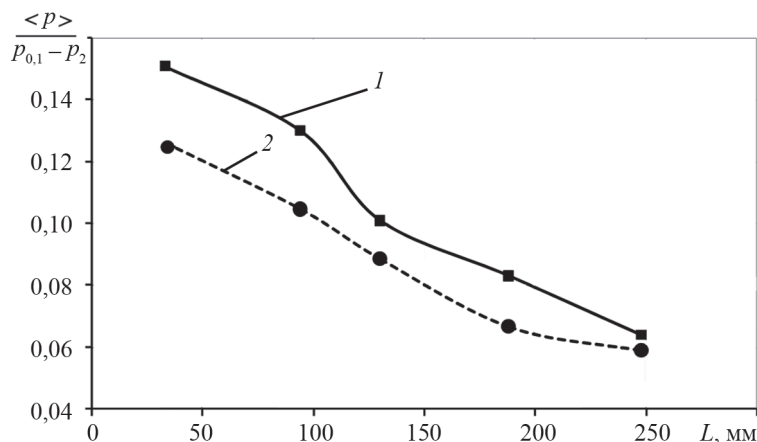


Рис. 5. Изменение интенсивности пульсаций давления вдоль отклоняющейся стенки канала при  $n = 2,5$  и  $\varepsilon_2 = 0,943$  без пластины (1) и с ее установкой во входном сечении (2)

кальных положительных продольных градиентов давления в области входного сечения.

В работе [17] говорится, что исходный механизм образования турбулентной кинетической энергии проявляется в интенсивном отбрасывании частиц жидкости, движущихся с малой скоростью из области, очень близкой к стенке. Последующие многочисленные исследования [18 — 22] подтвердили этот факт. Доказано, что наряду с процессами выброса частиц замедленной жидкости от стенки происходит вторжение в пристеночную область ускоренных частиц жидкости из внешней части слоя. Таким образом, отмеченное усиление интенсивности пульсаций давления, а значит, и пульсационного движения в пограничном слое, в начальном участке исследованного канала (см. рис. 5) связано с сохранением исходного движения вблизи стенки против возрастающего давления за счет переноса дополнительной энергии к стенке.

По мере продвижения вдоль стенки положительный градиент давления уменьшается, и снижается интенсивность пульсационного движения. Установка пластины параллельно отклоняющейся стенке не меняет характера распределения интенсивности пульсаций, но сама интенсивность падает на 2...3% в начальном участке канала и на 0,5% в конце отклоняющейся стенки.

В целом общий уровень пульсаций давления вдоль стенки становится ниже. В связи с этим можно рекомендовать применение исследованного способа управления течением в широкоугольных диффузорах не только с точки зрения уменьшения потерь энергии и выравнивания выходного поля скоростей, но также и снижения динамических нагрузок на стенки каналов, при проектировании диффузорных переходных патрубков от выходных диффузоров газовых турбин к котлу-утилизатору в парогазовых установках.

### Литература

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков. М.: Энергия, 1970.
2. Мигай В.К., Гудков Э.И. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин. Л.: Машиностроение, 1981.
3. Бычкова Л.А. Экспериментальное исследование каналов с предотрывным состоянием турбулентного пограничного слоя // ИФЖ. 1971. Т. 21. № 3. С. 518—525.
4. Зарянкин А.Е., Грибин В.Г., Дмитриев С.С. Сравнительная эффективность диффузорных каналов при различных методах аэродинамического воздействия на поток // Известия высш. учеб. заведений. Серия «Энергетика». 1991. № 4. С. 67—73.
5. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н. Управление и стабилизация в аэродинамике. М.: Высшая школа, 1978.
6. Edward C. e. a. Boundary Layer Separation Control on a Flat Plate with Adverse Pressure Gradients Using Vortex

### References

1. Deych M.E., Zaryankin A.E. Gazodinamika Diffuzorov i Vyhlopnih Patrubkov. M.: Energiya, 1970. (in Russian).
2. Migay V.K., Gudkov E.I. Proektirovanie i Raschet Vyhodnyh Diffuzorov Turbomashin. L.: Mashinostpoenie, 1981. (in Russian).
3. Bychkova L.A. Eksperimental'noe Issledovanie Kanalov s Predotryvnym Sostoyaniem Turbulentnogo Pogranichnogo Sloya. IFZH. 1971;21;3:518—525. (in Russian).
4. Zaryankin A.E., Grabin V.G., Dmitriev S.S. Sravnitel'naya Effektivnost' Diffuzornyh Kanalov pri Razlichnyh Metodah Aerodinamicheskogo Vozdeystviya na Potok. Izvestiya Vyssh. Ucheb. Zavedeniy. Seriya «Energetika». 1991;4:67—73. (in Russian).
5. Krasnov N.F., Koshevoy V.N. Upravlenie i Stabilizatsiya v Aerodinamike. M.: Vysshaya shkola, 1978. (in Russian).
6. Edward C. e. a. Boundary Layer Separation Control on a Flat Plate with Adverse Pressure Gradients Using Vortex

Generators // Proc. ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air. Barcelona, 2006. V. 3. Pp. 1211—1220.

7. **Ahmad K.A., Watterson J.K., Cole J.S., Briggs I.** Sub-Boundary Layer Vortex Generator Control of a Separated Diffuser Flow // Proc. 35<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conf. and Exhibit. Toronto, 2005. P. 1.

8. **Törnbloma O., Johansson A.V.** A Reynolds Stress Closure Description of Separation Control with Vortex Generators in a Plane Asymmetric Diffuser // Phys. Fluids. 2007. V. 19. No. 115108. Pp. 1—15.

9. **Reichert B.A., Wendt B.J.** An Experimental Investigation of S-duct Flow Control Using Arrays of Low Profile Vortex Generators // Proc. 31<sup>st</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Sponsored by the AIAA Reno. Nevada, 1993. P. 93-0018.

10. **Sullerey R.K., Mishra S., Pradeep A.M.** Application of Boundary Layer Fences and Vortex Generators in Improving Performance of S-Duct Diffusers // ASME. 2002. V. 124. Pp. 136—142.

11. **Paul A.R., Ranjan P., Patel V.K., Jain A.** Comparative Studies on Flow Control in Rectangular S-duct Diffuser Using Submerged-vortex Generators // Aerospace Sci. and Techn. 2013. V. 28. Pp. 332—343.

12. **Santner C. e. a.** The Application of Low-profile Vortex Generators in an Intermediate Turbine Diffuser // J. Turbomachinery. 2012. V. 134. Pp. 1—9.

13. **Zhang Y., Hu S., Zhang X.F., Benner M., Vlasic E.** Flow Control in an Aggressive Inter-turbine Duct Using Low Profile Vortex Generators // Proc. ASME Turbo Expo. Copenhagen, 2012. Pp. 1609—1619.

14. **Senseney M. B., Buter T.A., Bowersox R.D.W.** Flow Structure and Performance Characterization of an Offset Diffuser with and without Vortex Generator Jets // Proc. 31<sup>st</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. San Diego, 1995. Pp. 1—12.

15. **Pradeep A.M., Sullerey R.K.** Secondary Flow Control in a Circular S-duct Diffuser Using Vortex Generator Jets // Proc. 2<sup>nd</sup> AIAA Flow Control Conf. Portland, 2004. P. 2615.

16. **Зарянкин А.Е., Грибин В.Г., Дмитриев С.С.** Повышение эффективности плоских диффузоров путем установки пластин параллельно отклоняющимся стенкам канала // Энергетика. 1994. № 9—10. С. 72—81.

17. **Клайн С., Рейнольдс У., Шрауб Ф., Ранстэдлер П.** Структура турбулентных пограничных слоев // Механика. 1969. Т. 1116. № 4. С. 41—78.

18. **Хинце И.О.** Турбулентность. Ее механизм и теория. М.: Физматлит, 1963.

19. **Фрост У., Моулден Т.** Турбулентность. Принципы и применения. М.: Мир, 1980.

20. **Курбацкий А.Ф.** Лекции по турбулентности. Ч. 2 Моделирование турбулентных течений. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2001.

21. **Репик Е.У., Соседко Ю.П.** Управление уровнем турбулентности потока. М.: Физматлит, 2002.

22. **Репик Е.У., Соседко Ю.П.** Турбулентный пограничный слой. Методика и результаты экспериментальных исследований. М.: Физматлит, 2007.

Generators. Proc. ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air. Barcelona, 2006;3:1211—1220.

7. **Ahmad K.A., Watterson J.K., Cole J.S., Briggs I.** Sub-Boundary Layer Vortex Generator Control of a Separated Diffuser Flow. Proc. 35<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conf. and Exhibit. Toronto, 2005:1.

8. **Törnbloma O., Johansson A.V.** A Reynolds Stress Closure Description of Separation Control with Vortex Generators in a Plane Asymmetric Diffuser. Phys. Fluids. 2007;19;115108:1—15.

9. **Reichert B.A., Wendt B.J.** An Experimental Investigation of S-duct Flow Control Using Arrays of Low Profile Vortex Generators. Proc. 31<sup>st</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Sponsored by the AIAA Reno. Nevada, 1993:93-0018.

10. **Sullerey R.K., Mishra S., Pradeep A.M.** Application of Boundary Layer Fences and Vortex Generators in Improving Performance of S-Duct Diffusers. ASME. 2002;124. Pp. 136—142.

11. **Paul A.R., Ranjan P., Patel V.K., Jain A.** Comparative Studies on Flow Control in Rectangular S-duct Diffuser Using Submerged-vortex Generators. Aerospace Sci. and Techn. 2013;28:332—343.

12. **Santner C. e. a.** The Application of Low-profile Vortex Generators in an Intermediate Turbine Diffuser. J. Turbomachinery. 2012;134:1—9.

13. **Zhang Y., Hu S., Zhang X.F., Benner M., Vlasic E.** Flow Control in an Aggressive Inter-turbine Duct Using Low Profile Vortex Generators. Proc. ASME Turbo Expo. Copenhagen, 2012:1609—1619.

14. **Senseney M. B., Buter T.A., Bowersox R.D.W.** Flow Structure and Performance Characterization of an Offset Diffuser with and without Vortex Generator Jets. Proc. 31<sup>st</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. San Diego, 1995:1—12.

15. **Pradeep A.M., Sullerey R.K.** Secondary Flow Control in a Circular S-duct Diffuser Using Vortex Generator Jets. Proc. 2<sup>nd</sup> AIAA Flow Control Conf. Portland, 2004:2615.

16. **Zaryankin A.E., Gribin V.G., Dmitriev S.S.** Povyshenie Effektivnosti Ploskih Diffuzorov Putem Ustanovki Plastin Parallelno Otklonyayushchimsya Stenkam Kanala. Energetika. 1994;9—10:72—81. (in Russian).

17. **Klayn S., Reynold's U., Shraub F., Ranstedler P.** Struktura Turbulentnyh Pogranichnyh Sloev. Mekhanika. 1969;1116;4:41—78. (in Russian).

18. **Hintse I.O.** Turbulentnost'. Ee mekhanizm i Teoriya. M.: Fizmatlit, 1963. (in Russian).

19. **Frost U., Moulden T.** Turbulentnost'. Printsipy i Primeneniya. M.: Mir, 1980. (in Russian).

20. **Kurbatskiy A.F.** Lektsii po Turbulentnosti. Ch. 2 Modelirovanie Turbulentnyh Tечений. Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2001. (in Russian).

21. **Repik E.U., Sosedko Yu.P.** Upravlenie Urovнем Turbulentnosti Potoka. M.: Fizmatlit, 2002.

22. **Repik E.U., Sosedko Yu.P.** Turbulentnyy Pogranichnyy Sloy. Metodika i Rezul'taty Eksperimental'nyh Issledovaniy. M.: Fizmatlit, 2007. (in Russian).

**Сведения об авторах:**

**Дмитриев Сергей Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: DmitriyevSS@mpei.ru

**Мохамед Саед Мохамед Солиман Осман** — аспирант кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: eng\_salo\_0100@yahoo.com

**Барбашин Артем Владимирович** — студент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: art.barbashin@gmail.com

**Information about authors:**

**Dmitriev Sergey S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Steam and Gas Turbines named A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: DmitriyevSS@mpei.ru

**Mokhamed Saed M.S.O.** — Ph.D.-student of Steam and Gas Turbines named A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: eng\_salo\_0100@yahoo.com

**Barbashin Artem V.** — Student of Steam and Gas Turbines named A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: art.barbashin@gmail.com

**Работа выполнена при поддержке:** РФФИ (грант № 16-08-00908)

**The work is executed at support:** RFBR (grant No. 16-08-00908)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 15.03.2018

**The article received to the editor:** 15.03.2018