

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ОТРЫВНЫХ ПОТОКОВ

А.Ю. Дьяченко, Я.И. Смутьский, В.И. Терехов, Н.И. Ярыгина

*Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия, terekhov@itp.nsc.ru*

Резюме

В докладе представлены результаты экспериментального исследования пассивного метода воздействия на турбулентное отрывное течение и теплообмен одиночного минитурбулизатора, существенно меньшего геометрического масштаба по сравнению с основным препятствием. Управление отрывным потоком осуществляется за счет введения в отрывную область дополнительного вихревого слоя, приводящего к кардинальным изменениям структуры рециркуляционной и релаксационной зон, смещению точки присоединения потока и соответственно к перераспределению коэффициентов давления и теплоотдачи. Перестройка течения наглядно продемонстрирована в распределениях продольной скорости и ее продольной среднеквадратичной пульсации, измеренных методом PIV.

Введение

Наиболее простые геометрические конфигурации с отрывом потока, такие как обращенный назад уступ при резком расширении канала и каверна (выемка), широко встречаются в различных энергетических установках и теплообменных устройствах. При наличии теплообмена наряду с динамическими параметрами первостепенное значение приобретает изучение тепловых характеристик и всех факторов, влияющих на них. В последнее время большое внимание уделяется проблемам управления динамическими и тепловыми характеристиками отрывного течения, обусловленным важными практическими приложениями для нужд теплоэнергетики, химической технологии и охлаждения электроники. Самым простым способом воздействия на отрывное течение является использование перед преградами минитурбулизаторов, вихревых генераторов различной формы [1-3], то есть дополнительных турбулизирующих элементов, существенно меньших геометрических масштабов основного препятствия. Этот способ относится к пассивному методу контроля отрывом потока и, хотя он по эффективности уступает активным методам, таким как наложенные пульсации скорости или давления, пористый или щелевой вдув струи, однако является более доступным и менее затратным.

С точки зрения интенсификации теплообмена в отрывных потоках минипреградами интерес представляет поиск оптимальных размеров вихреобразователей и их местоположения до преграды. Фактически эта проблема осложнена взаимодействием двух отрывных течений с разными масштабами и взаимодействием разномасштабных когерентных структур, которые они создают [4].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В докладе представлены результаты экспериментального исследования влияния вихревого слоя на отрывное турбулентное течение и теплообмен за ступенькой и в поперечной каверне с наклонными боковыми стенками от расположенного перед преградой микротурбулизатора в виде малого поперечного ребра высотой на порядок меньшей, чем высота ступеньки или глубина каверны. Частично эти данные были представлены в работе [5]. К ним добавлены более детальные результаты по профилям скорости и продольным пульсациям, полученные методом трассерной визуализации PIV [6], которые позволяют оценить релаксацию возмущений за счет интерференции отрывных потоков. Подробное описание экспериментов дается в работах [5,6], и в данном докладе обсуждаются некоторые наиболее характерные результаты.

На рис. 1а представлена схема обтекания обращенного назад уступа, образованного резким расширением плоского прозрачного канала, выполненного из оргстекла. Микротурбулизатор имеет квадратное сечение. Все размеры на данном рисунке приведены в миллиметрах. В соответствии с рекомендациями [2] выбрана наиболее оптимальная высота минипреграды и ее расстояние до уступа,

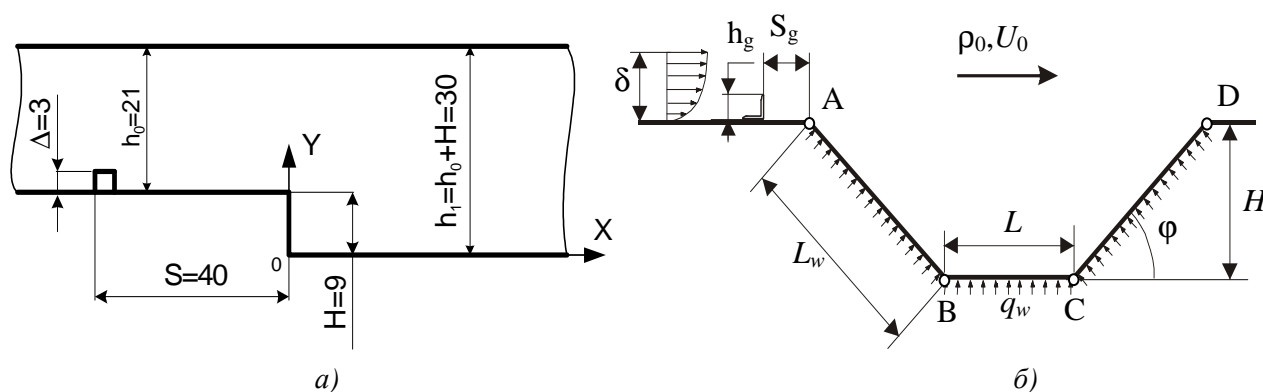


Рис. 1. Схема обтекания обратного уступа с минипреградой (а) и каверны с миниребром (б).

когда точка присоединения от миниребра попадает в рециркуляционную область за уступом. На рис. 1б дана схема обтекания каверны, с расположенным перед отрывом миниребром. В опытах варьировалась высота малого ребра и его расстояние до препятствия, кроме того изменялся угол наклона передней и задней стенок каверны.

Измеренные методом PIV за обратным уступом профили продольной скорости и продольной среднеквадратичной пульсации продемонстрированы на рис.2а, б и по ним были оценены размеры отрывной зоны при наличии и отсутствии вихревого генератора (рис. 3). Показано, что для отрывного течения с дополнительным возмущением характерным является расширение слоя смешения и приближение его к стенке, разрушение области вторичного вихря. При наличии миниребра перед уступом имеет место деформация входного профиля, связанная с наличием собственной рециркуляционной области. Взаимодействие двух отрывных потоков оказывает значительное

влияние на структуру течения после внезапного расширения за уступом. В соответствии с данными рис. 2а, в области смешения не наблюдается точка перегиба, которая характерна для конфигурации

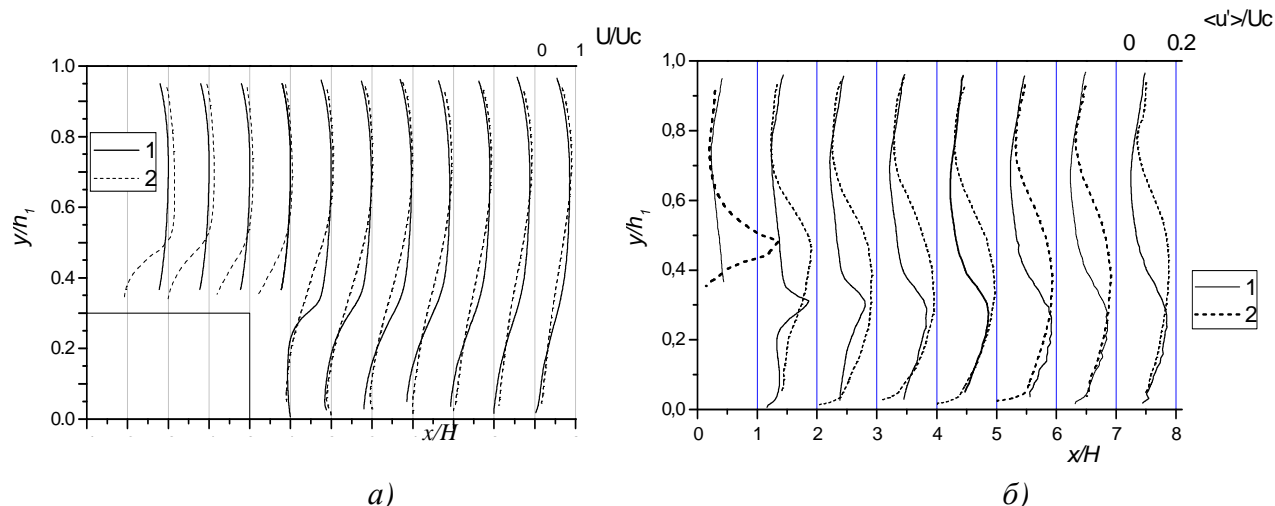


Рис. 2. Профили средней продольной скорости (а) и среднеквадратичной продольной пульсации скорости (б) за уступом.

1– без преграды, 2– с вихревым генератором - миниребротом перед уступом
($h=3$ мм; $H=9$ мм; $S_g=40$ мм).

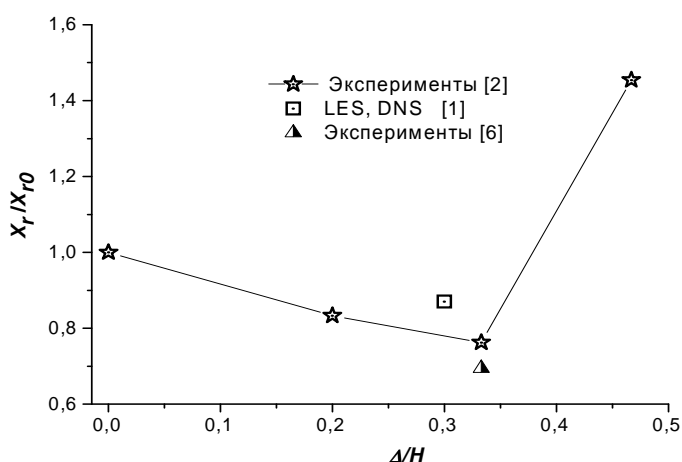


Рис.3. Влияние высоты преграды Δ/H на изменение длины зоны рециркуляции X_r

без минипреграды на расстоянии от стенки примерно равной высоте уступа. Рис. 2б показывает высокий уровень турбулентности, рождаемый отрывом потока за минипреградой, который оказывает влияние на всю область течения после внезапного расширения канала. Сильно повышается уровень пульсаций в слое смешения. Релаксация возмущений за счет интерференции отрывных потоков

происходит на достаточно больших расстояниях от точки отрыва. При этом особенно медленно вырождаются турбулентные пульсации. Судя по рис. 2б отличие в распределениях пульсаций отчетливо наблюдается на всех исследованных удалениях от уступа, тогда как для средних скоростей (рис. 2а) начальные возмущения практически перестают сказываться, начиная с $x/H > 8$. Точка присоединения оценивалась по местоположению координаты точки, где происходит изменение знака продольной скорости в пристенной области течения. В соответствии с рис. 3 сокращение отрывной области под влиянием вихревого генератора составило около 30 %. При этом в результате численных расчетов в работе [5] отмечено значительное увеличение уровня отрицательных касательных напряжений в зоне рециркуляции потока.

Для случая исследования поперечной каверны были получены новые данные по вихреобразованию, полям давления, профилям температуры и интенсификации теплоотдачи в отрывных потоках [5].

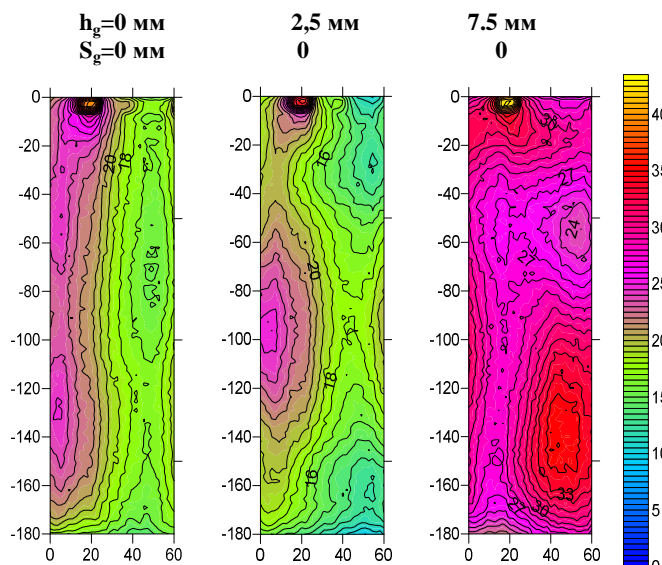


Рис. 4. Термограмма дна прямоугольной каверны с минитурбулизатором переменной высоты на передней кромке.

Эксперименты проведены в канале аэродинамической трубы Института теплофизики СО РАН размерами $200 \times 200 \times 1000 \text{ мм}^3$. Каверна располагалась на дне канала и в опытах по визуализации на боковой стенке канала. На противоположной стороне размещалась стенка из оптического стекла. Визуализация течения в прямоугольной каверне, выполненная методом термографии, наглядно продемонстрировала перестройку течения при изменении высоты вихревого генератора (рис. 4) и расстояния до передней кромки. Наиболее сильная перестройка течения при увеличении высоты интенсификатора на

передней кромке прямоугольной каверны наблюдается в зоне вторичного течения непосредственно за расширением канала. За передней стенкой кроме угловых вихрей появляется крупный вихрь в центре области. В каверне возникает неустойчивость течения и переход от структуры основного вихря, состоящей из одной ячейки, к структуре из двух ячеек. Аналогичная неустойчивость течения в полости при отсутствии вихревого генератора зафиксирована в кавернах с углом наклона боковых стенок $\varphi < 70^\circ$. При удалении минипреграды вверх по потоку от кромки каверны течение в каверне становится все более мелкомасштабным, особенно когда точка присоединения отрывного потока за ребром находится перед каверной.

На рис. 5 показано влияние местоположения ребра высотой 5 мм на распределение коэффициента давления в каверне и ее окрестности. Резкое снижение коэффициента давления, обычно соответствующее повышению теплоотдачи в отрывной области, относится к случаям попадания точки присоединения за миниребром в каверну. Когда точка присоединения находится за каверной, распределение C_p становится близким к случаю нахождения точки присоединения до каверны. При изменении высоты вихревого генератора получено, чем выше преграда, тем сильнее уменьшается коэффициент давления в каверне и возрастает в непосредственной близости перед каверной и за ней.

Коэффициенты теплоотдачи в каверне при нагреве боковых стенок и дна были рассчитаны как по тепловизионным, так и по термопарным измерениям [5]. Увеличение теплоотдачи до 20%

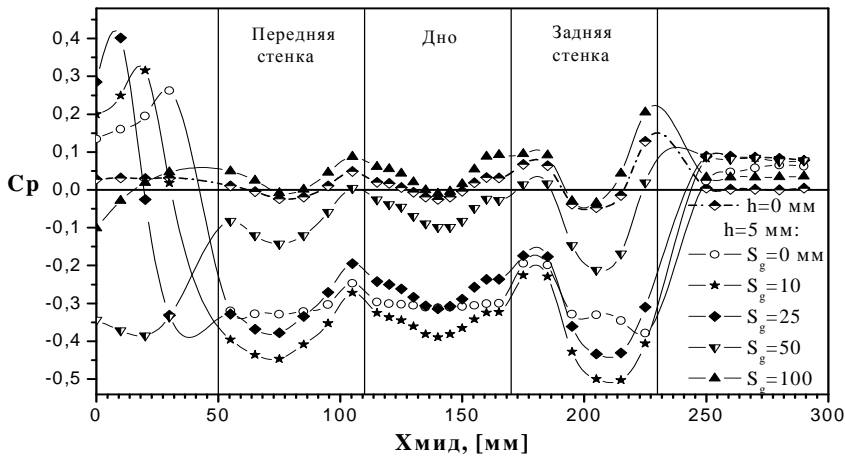


Рис. 5. Распределение коэффициента давления вдоль центрального сечения прямоугольной поперечной каверны при различных расстояниях минитурбулизатора от передней кромки.

$\varphi = 90^\circ$, $U_c = 30$ м/с, миниребро ($h = 5$ мм), отступ S_g -var, $H = 60$ мм.

имело место для прямоугольной каверны, когда высота миниребра равнялась 1/5 от глубины полости, а расстояние до каверны составляло от двух до пяти калибров по высоте минипреграды. Влияние миниребра на теплообмен в каверне, как и на распределение давления, практически незаметно, когда точка присоединения за ним находится перед каверной или за ней. Эффект интенсификации теплоотдачи в

поперечной каверне имеет место только при попадании точки присоединения в каверну, причем более выраженный в прямоугольной каверне по сравнению с кавернами с наклонными передней и задней стенками.

Заключение

Экспериментально продемонстрировано, насколько сложные процессы происходят при взаимодействии двух отрывных течений с разными масштабами. Проведенные исследования показали, существенное влияние маломасштабных преград на вихреобразование и теплообмен в отрывных областях за обращенным назад уступом и в поперечной полости. Вихревая пелена, рождаемая минипреградой, при условии ее попадания в область основного вихря за обратным уступом, взаимодействует с ним и сокращает область рециркуляции. Наблюдается деформация входного профиля и особенно его пульсации продольной скорости с сильной трансформацией зоны смешения. Значительное влияние на вихреобразование оказывает вихревая пелена от миниребра при попадании в поперечную каверну. В прямоугольной каверне возникает неустойчивость течения, когда основной вихрь распадается на две ячейки. Такое явление без минитурбулизатора возникает только при угле наклона передней и задней стенок каверны 70° . Перестройка течения отражается на поведении коэффициентов давления и теплоотдачи.

Для таких случаев коэффициент давления в области отрыва снижается, а максимальное значение коэффициента теплоотдачи возрастает по сравнению со случаем отсутствия вихревого генератора. Сильное влияние на характеристики теплообмена оказывает как месторасположение минипреграды, так и ее высота.

Оптимальная высота малой преграды может варьироваться от 1/5 до 1/3 высоты основной преграды. А местоположение определяется таким образом, чтобы точка присоединения от миниребра попадала в рециркуляционную область за обратной ступенькой или в каверну. Только в этом случае имеет место осязаемое взаимодействие двух отрывных течений с разными масштабами. Достаточно сильное влияние можно объяснить мелкомасштабной турбулентностью малых турбулизаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 10-08-00105, 12-08-00249).

Обозначения

C_p – коэффициент давления, $C_p=2(p_i-p_c)/\rho U_c^2$; H – высота уступа или глубина каверны, мм;
 h – высота вихревого генератора, мм; p – давление, н/м²; p_c – давление в набегающем потоке, н/м²; S_g – расстояние вихревого генератора до ступеньки или каверны; U_c – скорость набегающего потока, м/с; u' – продольная среднеквадратичная пульсация скорости, м/с; x – продольная координата, м, мм; ρ – плотность, кг/м³; φ – угол наклона боковых стенок каверны, °.

Литература

- [1] Neumann J., Wengle H. DNS and LES of passively controlled turbulent backward-facing step flow // Flow, Turbulence and Combustion. 2003. Vol. 71. pp. 297-309.
- [2] Miao J.J., Lee K.C., Chen M.H., Chou J.H. Control of Separated flow by a two-dimensional oscillating fence // AIAA J. 1991. Vol. 29. pp. 1140-1148.
- [3] Isomoto, K., Honami. S. The effect of inlet turbulence intensity on the reattachment processes over a backward-facing step // Trans. JSME. 1988. Vol. 54B. pp. 51-58.
- [4] Neumann J., Wengle H. Coherent structures in controlled separated flow over sharp-edged and rounded steps // Journal of Turbulence. 2004. Vol. 5, N 22. 14 p.
- [5] Bogatko T.V., D'yachenko A.Yu., Terekhov V.I., Yarygina N.I. Control of heat transfer in separated flows with the help of miniturbulators // ASME Conf. Proc. of the 14-th Int. Heat Transfer Conf., Washington D.C., USA. – 8-13 August 2010. Paper IHTC14 - 22153. pp. 303-309.
- [6] Терехов В.И., Смутьский Я.И., Шаров К.А. Интерференция отрывных потоков за обратным уступом при наличии пассивного управления // Письма в «Журн. техн. физики». 2012. Т.38, вып. 3. С. 46-53.