УДК 536.524

ВЛИЯНИЕ ПАССИВНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В ОТРЫВНОЙ ОБЛАСТИ ЗА ОБРАТНОЙ СТУПЕНЬКОЙ

© 2021 г. А. В. Барсуков^{1, *}, В. В. Терехов^{1, 2}, В. И. Терехов²

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия ²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия *E-mail: andreybarsukov96@gmail.com

> Поступила в редакцию 28.03.2020 г. После доработки 28.03.2020 г. Принята к публикации 18.06.2020 г.

Представлены результаты численного исследования турбулентного отрывного течения и теплообмена в канале с внезапным расширением при наличии пассивного возмущения, которое создавалось с помощью ребра-вихрегенератора. Высота ребра и его местоположение перед уступом изменялись в широких пределах. Результаты моделирования показали сильное влияние вихрегенератора на поле турбулентной энергии и коэффициент трения. Значение коэффициента теплоотдачи при этом изменяется несущественно, что говорит о консервативности теплообмена к генерируемым ребром возмущениям. Обсуждаются причины такого поведения динамических и тепловых характеристик, представлено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, подтверждающее их качественное согласие.

DOI: 10.31857/S0040364421010026

введение

Изучению методов управления характеристиками течения и тепломассопереносом в отрывных потоках в последнее время уделяется все более пристальное внимание. Исследования в этой области инициированы, прежде всего, важными практическими приложениями в энергетике, химических технологиях и других отраслях техники. Особый интерес при этом вызывают пассивные методы управления в силу простоты их практической реализации и удобства эксплуатации в составе теплообменного оборудования. В зависимости от конкретного предназначения подобные методы позволяют дополнительно интенсифицировать тепломассообмен, сократить либо, наоборот, расширить размер рециркуляционной зоны и изменять уровень гидравлических потерь. Подробную информацию о потенциальных возможностях пассивных методов управления отрывными течениями можно найти в работах [1-4].

Наиболее простой схемой управления течением является установка вихрегенератора, в частности тонкого ребра, перед отрывным обтеканием обращенного против потока уступа. Подобная классическая схема модификации отрывного течения изучалась в ряде работ экспериментально [5–8] и численно [9, 10]. В работе [11] управление потоком осуществлялось за счет установки ребра на верхней стенке канала напротив уступа. В упомянутых исследованиях отмечается чрез вычайно сложная картина течения, являюшаяся результатом взаимодействия двух отрывных потоков с сильно различающимися масштабами: большим – за уступом и малым – за ребромвихрегенератором. В зависимости от соотношения их размеров, местоположения ребра, степени расширения канала, а также ряда иных факторов возможно существование различных сценариев развития отрывных течений. Так, по данным [5, 7, 9], установка ребра непосредственно на кромке уступа значительно турбулизирует слой смешения после отрыва, увеличивая размер рециркуляционной зоны, и тем самым смещает точку присоединения вниз по потоку. Если же ребро располагается на расстоянии примерно $X/\Delta \sim 10-15$ до кромки уступа и оторвавшийся за ребром поток успевает присоединиться к стенке, то воздействие его на глобальный отрыв за ступенькой значительно уменьшается, а размер отрывного пузыря становится минимальным и интенсивность его ослабевает. Подобные тенденции имеют место и для тепловой картины процесса взаимодействия отрывных потоков с сильно отличающимися масштабами, когда небольшие по интенсивности возмущения могут приводить к заметной перестройке тепловых полей и распределений коэффициентов теплоотдачи по теплообменной поверхности [12]. Еще более сложными и многофакторными особенностями обладают течения при установке трехмерных преград – вихрегенераторов (табов) [13, 14], которые с практической точки зрения являются более приемлемыми в качестве интенсификаторов теплообмена, нежели двумерные.

Анализ современного состояния проблемы пассивного управления отрывными течениями показал. что в этой области сделаны первые шаги. которые свидетельствуют о больших потенциальных возможностях подобных методов. Совершенно очевидно, что исследования в данном направлении нуждаются в углублении и детализации, причем не только структуры течения, но и тепломассопереноса. Данная работа является развитием программы исследований процесса интерференции отрывных потоков с различающимися масштабами [7, 8, 12, 14]. Здесь представлены результаты численных исследований турбулентного течения и теплообмена при вариации геометрических параметров, таких как размер ребра, его местоположение и степень расширения канала. Результаты численного анализа сопоставляются как с собственными экспериментальными данными, так и с результатами других авто-DOB.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ

Схема течения показана на рис. 1. В целом она подобна таковой при проведении экспериментальных исследований [7, 8]. В плоском, неограниченном в поперечном направлении канале высотой $h_0 = 21$ мм, на варьируемом в расчетах расстоянии L₀ располагается обратный уступ с размером ступеньки H = 9 мм, так что степень расширения канала составляет $ER = h_1/h_0 = 1.43$. На нижней стенке подводящего канала устанавливается вихрегенератор в виде тонкого ребра толщиной e = 3 мм и различной высоты $\Delta = 1.5 - 1.5$ 6 мм, при этом отношение линейных масштабов преграды и уступа изменялось в пределах $\Delta/H =$ = 1/6 - 2/3. Расстояние между ребром и кромкой уступа также варьировалось в максимально возможных пределах от S = 0 (на краю уступа) и $S \rightarrow \infty$ (отсутствие ребра).



Рис. 1. Схема течения.

Все стенки канала были адиабатическими, за исключением нижней за основанием уступа, к которой подводился постоянный по длине тепловой поток. Течение считается несжимаемым, теплофизические свойства – постоянными. Число Рейнольдса, рассчитанное по высоте уступа, полагалось неизменным и равным Re = 5000.

Численное моделирование вышеописанного течения проводилось с помощью пакета Орел-FOAM. Физико-математическая модель основывалась на двумерных осредненных по Рейнольдсу уравнениях неразрывности, движения и энергии для несжимаемой жидкости. Для замыкания этой системы в настоящей работе использовалась SST $k-\omega$ -модель турбулентности, которая достаточно хорошо описывает отрывные течения [15, 16]. Уравнение переноса энергии замыкалось простой градиентной моделью с эффективным коэффициентном температуропроводности, определяемым постоянным "турбулентным" числом Прандтля, равным 0.8.

Интегрирование всех уравнений, входящих в математическую модель, проводилось с помощью метода контрольного объема второго порядка точности по пространству в стационарной (итерационной) постановке и солвера simple-Foam из пакета OpenFOAM.

Для каждой рассмотренной в работе геометрии был проведен тщательный подбор вычислительной сетки, которая в настоящей задаче была структурированной прямоугольной. Критериями нахождения оптимального количества ячеек были расстояние первой ячейки от стенки не более 1 в единицах "закона стенки", наличие не менее десяти ячеек в вязком подслое и "выход" на неизменное решение по мере использования все более сгущающихся сеток. В результате использования указанных критериев, характерное число ячеек сетки составляло 10⁵.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Визуализация течения. Результаты визуализации течения демонстрируются на рис. 2 и 3. Как видно на рис. 2, где показано поле продольной компоненты скорости, место расположения вихрегенератора сильно влияет на структуру течения. Если при отсутствии ребра (рис. 2а) рециркуляционное течение находится строго в "тени" за уступом, то при наличии вихрегенератора (рис. 2б и 2в) из-за усиления процессов струйного смешения поперечный размер его заметно возрастает. Увеличивается также и продольный масштаб отрывного пузыря, что наиболее ярко проявляется при установке ребра непосредственно на кромке уступа перед отрывом потока.

Распределение кинетической энергии турбулентности при идентичных с рис. 2 условиях представлены на рис. 3. Можно отметить те же



Рис. 2. Поля продольной компоненты скорости при изменении местоположения ребра-вихрегенератора, Re = 5000, $\Delta/H = 0.33$: (a) $S/\Delta \rightarrow \infty$, (b) 10.33, (b) 0.



Рис. 3. Кинетическая энергия турбулентности при различном местоположении вихрегенератора, Re = 5000, $\Delta/H = 0.33$: (a) $S/\Delta \rightarrow \infty$; (b) 10.33; (b) 0; (г) $\Delta/H = 0.66$, $S/\Delta = 0$.



Рис. 4. Распределение трения на поверхности в отрывной области при вариации местоположения вихрегенератора, Re = 5000, $\Delta/H = 0.33$: $1 - S/\Delta = 0$, 2 - 6.66, 3 - 13.33, 4 - 16.66, $5 - \infty$.

особенности формирования поля течения, что и на картинах осредненной компоненты скорости, изображенных на рис. 2. Действительно, область повышенной турбулентности при отрыве потока без возмущений (рис. 3а) занимает небольшое пространство непосредственно в слое смешения оторвавшегося потока с рециркуляционной зоной. Интенсивность турбулентности здесь относительно невелика, так же как и ее протяженность вниз по потоку.

Принципиально изменяется картина турбулентных пульсаций в случае, когда на отрыв за уступом оказывает влияние вихрегенератор. Если ребро расположено на некотором расстоянии от кромки уступа (рис. 3б), то оно само становится источником турбулентности, и эта область является достаточно продолжительной. Как отмечается в экспериментальных работах [5, 7, 8] степень влияния этого вихревого следа на отрывное течение за уступом зависит преимущественно от того, происходит ли его проникновение в слой смешения за уступом. Если ребро достаточно далеко расположено от кромки уступа, как, например, на рис. 36, то в этом случае влияние возмущений кардинально не отражается на структуре поля турбулентности и лишь незначительно повышает турбулентную энергию в области рециркуляции течения.

Совершенно иная картина наблюдается при расположении ребра непосредственно перед отрывом потока (рис. 3в). Хорошо видно, что область с высоким уровнем турбулентной энергии расширяется как в продольном, так и поперечном направлениях. При установке более высокого ребра $\Delta/H = 0.66$ возмущенная высокотурбулент-

ная зона занимает большую часть канала как в продольном, так и поперечном направлениях, что наглядно демонстрируется на рис. 3г. Очевидно, что отмеченные особенности формирования структуры течения будут заметны на размерах отрывной области, координате точки повторного присоединения потока, а также интенсивности теплообмена.

Поверхностное трение. Координата точки присоединения. Распределение коэффициента трения на нижней поверхности канала, начиная от основания уступа, при различном удалении ребра-вихрегенератора от точки отрыва потока S/Δ представлено на рис. 4. Предельными случаями расположения вихрегенератора являются $S/\Delta = 0$, когда ребро установлено на кромке ступеньки, и $S/\Delta \rightarrow \infty$, когда ребро-вихрегенератор отсутствует. Для промежуточных значений S/Δ все расчетные линии располагаются в диапазоне между ними.

Наличие вихрегенератора сильно влияет на величину трения на поверхности. Так, в области рециркуляционного течения, где коэффициент трения принимает отрицательное значение ($C_f \leq 0$), для случая установки ребра на кромке его абсолютное значение практически в два раза выше, чем в канале без вихрегенератора. Столь сильное изменение касательных напряжений говорит об увеличении интенсивности вихревых обратных токов в рециркуляционной зоне. Однако далее вниз по течению отмеченное различие в распределении коэффициента трения при вариации параметра S/Δ достаточно быстро вырождается и при X/H > 25 вследствие релаксационных процессов все расчетные данные располагаются близко друг от друга.

Для отрывных течений одним из характерных параметров является расстояние X_r от точки отрыва потока до повторного его присоединения. Это расстояние примерно соответствует продольному размеру отрывного пузыря. Координата точки присоединения определяется условием отсутствия касательных напряжений на стенке $C_f = 0$ и легко определяется по данным рис. 4. Результаты расчетов величины X_r/H в зависимости от степени удаления ребра от кромки уступа S/Δ и при различной высоте ребер Δ/H изображены на рис. 5. Отметим основные особенности поведения параметра X_r/H .

Если ребро расположено достаточно далеко от точки отрыва или отсутствует ($S/\Delta \rightarrow \infty$), масштаб рециркуляционной зоны становится постоянным и не зависящим от высоты ребра $X_r/H \sim 8$. Причем эта величина коррелирует с имеющимися в литературе экспериментальными данными [1, 8]. По мере приближения ребра к кромке уступа точка присоединения смещается вниз по потоку, тем самым увеличивая размер отрывного пузыря. Этот эффект значительно усиливается для высоких ребер, и, как видно из рис. 5, максимально продольный масштаб отрывной зоны может увеличиться почти в три раза по сравнению со случаем обтекания гладкого уступа.

На рис. 5 представлены также результаты измерений масштаба рециркуляционной зоны, проведенных в [7], а также численных исследований [9]. Можно отметить их качественное согласие с результами настоящих расчетов, заключающееся в увеличении размера отрывной зоны по мере приближения вихрегенератора к точке отрыва потока за ступенькой. Однако количественного совпадения эксперимента и расчетов получить не удалось. Экспериментальные данные дают заниженные значения величины X_r/H по сравнению с расчетными. Объяснить сейчас причину такого несоответствия не представляется возможным. Это может быть вызвано как погрешностями эксперимента, так и несовершенством моделей турбулентности при численных исследованиях. Еще одним важным фактором, осложняющим сопоставление настоящих результатов и данных указанных экспериментов, является то, что числа Рейнольдса в расчетах и эксперименте отличались между собой. Кроме того, степень расширения канала и, как следствие, значительная величина продольного градиента давления, вызванного его расширением, могли быть различными в том и другом случаях.

Теплообмен. Особенности влияния ребра-вихрегенератора на интенсивность турбулентного теплообмена можно проанализировать на рис. 6, где показано изменение локального числа Нуссельта Nu = $\alpha H/\lambda$ по длине канала. Представленные данные соответствуют тем же условиям, что и для коэффициента трения на рис. 4.

Принципиальным отличием данных по конвективному теплообмену от трения на стенке является весьма слабое влияние вихрегенератора на величину коэффициента теплоотдачи. Действительно, если коэффициент трения в зоне рециркуляции при наличии ребра возрастает в несколько раз, то теплоотдача изменяется незначительно. Более наглядно этот вывод следует из рис. 7а, где представлены данные для максимального числа Нуссельта Nu_{max} при установке вихрегенераторов различной высоты и вариации их расположения относительно точки отрыва. Для невысокого ребра ($\Delta/H = 0.33$) интенсификации теплообмена практически не происходит, а для самого высокого ($\Delta/H = 0.66$) рост теплоотдачи не превышает 25%. При этом наиболее интенсивно теплообмен происходит при установке вихрегенератора на расстояниях $S/\Delta = 5-7$ калибров по высоте ребра.

Тепловая картина отрывного течения за обратной ступенькой при наличии пассивного возмущения сильно отличается от динамической. Под-



Рис. 5. Координата точки присоединения отрывного потока, расчет: $1 - \Delta/H = 1/6$; 2 - 1/3; 3 - 2/3; 4 - [9], DNS, $\Delta/H = 0.3$, Re = 3000; эксперимент: 5 - [7], $\Delta/H = 1/3$, Re = 15500; 6 - [7], 2/3, 15500; 7 - [13], 0.06, 24000.



Рис. 6. Локальный теплообмен при отрыве потока и воздействии пассивного возмущения, расчет: $1 - S/\Delta = 0$, 2 - 6.66, 3 - 13.33, 4 - 16.66, $5 - \infty$; эксперимент [12]: $6 - \Delta/H = 1/3$, Re = 5000.

тверждением этому служат данные по значению координаты максимальной теплоотдачи X_{max}/H , которые изображены на рис. 76. В экспериментальных исследованиях течения и теплообмена без вихрегенераторов установлено, что координаты точки присоединения и максимальной теплоотдачи, как правило, располагаются достаточно близко друг от друга [1]. Этого не наблюдается при отрыве потока с возмущением. При сравнении данных рис. 5 и 76 видно, что максимум теплообмена достигается задолго до точки повторно-



Рис. 7. Влияние вихрегенератора на максимальное число Нуссельта (а) и координату точки максимальной теплоотдачи (б), расчет: $1 - \Delta/H = 1/6$, 2 - 1/3, 3 - 2/3; эксперимент [12]: $4 - \Delta/H = 1/3$, Re = 5000; 5 - 2/3, 5000.

го присоединения. Особенно сильное отличие X_r от X_{max} имеет место при интенсивных воздействиях возмущений от вихрегенератора, когда ребро максимально приближено к кромке обратного уступа.

Отмеченная выше важная особенность поведения динамических и тепловых характеристик отрывных потоков при наличии пассивного возмущения является следствием сложного механизма проникновения крупномасштабных структур, генерируемых ребром, в сорванный с кромки уступа слой смешения. При этом причины консервативности пристенного теплообмена к подобным возмущениям требуют более детального рассмотрения.

Представленные на рис. 5–7 данные экспериментов по существу из единственной работы [12] демонстрируют те же самые тенденции, что и результаты численных исследований. В распределении локального числа Нуссельта (рис. 5) наибольшее расхождение расчета и эксперимента имеет место в непосредственной окрестности основания уступа, где трудности достоверных результатов как измерений, так и расчетов общеизвестны. Для величины максимума числа Нуссельта расчет дает заниженные результаты (рис. 7а), а для координаты его расположения, наоборот, завышает значение X_{max}/H (рис. 76).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного исследования свидетельствуют о сильном отличии воздействия пассивных возмущений на гидродинамику и теплообмен отрывного течения за обратной ступенькой. Действительно, согласно данным расчета, продольный размер отрывного пузыря может изменяться в три раза в зависимости от места расположения вихрегенератора. О такой же тенденции говорят и результаты экспериментов. В области рециркуляции отрывного течения трение может вырасти более чем в два раза, если ребро-вихрегенератор располагается непосредственно перед отрывом потока.

Для теплообмена можно отметить его консервативность к воздействию подобных возмущений, поскольку максимальное их влияние на интенсивность теплопереноса не превышает 25%. При этом наибольший эффект увеличения теплоотдачи достигается при расположении ребра на расстоянии $S/\Delta = 5-7$ калибров до кромки уступа. Координата максимума числа Нуссельта не совпадает с точкой повторного присоединения потока и значительно сдвигается к основанию уступа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00161).

Обозначения. $C_f/2 = \tau_w/(\rho U_0^2) - \kappa o \Rightarrow \phi \phi$ ициент трения; e – ширина ребра, м; H – высота уступа, м; h_0 – высота канала до расширения, м; h_1 – высота канала после расширения, м; k – кинетическая энергия турбулентности, Дж; L_0 – длина канала перед уступом, м; L_1 – длина канала после уступа, м; Nu = $q_w H/(\lambda(T_w - T_0))$ – число Нуссельта; q_w – тепловой поток, Вт/м²; Re = UH/ν – число Рейнольдса; S – расстояние от ребра до уступа, м; T_0 – температура потока в канале, °C; T_w – температура стенки, °C; U – скорость, м/с; u'_i – пульсация скорости, м/с; ν – кинематическая вязкость, $M^2/c; \rho$ — плотность, кг/м³; Δ — высота ребра, м; λ — коэффициент теплопроводности, Bt/(м K).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смульский Я.И., Ярыгина Н.И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 239 с.
- 2. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 797.
- 3. *Вараксин А.Ю*. Обтекание тел дисперсными газовыми потоками // ТВТ. 2018. Т. 56. № 2. С. 282.
- 4. Гапонов С.А., Терехова Н.М. Тепломассообмен в сверхзвуковом пограничном слое как способ управления режимами обтекания // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 733.
- Miau J.J., Lee K.C., Chen M.H., Chou J.H. Control of Separated Flow by a Two-dimensional Oscillating Fence // AIAA J. 1991. V. 29. P. 1140.
- Gautier N., Aider J.-L. Feed-forward Control of a Perturbed Backward-facing Step Flow // J. Fluid Mech. 2014. V. 759. P. 181.
- 7. Терехов В.И., Смульский Я.И., Шаров К.А. Экспериментальное исследование структуры отрывного течения за уступом при наличии пассивного возмущения // ПМТФ. 2016. Т. 57. № 1. С. 207.
- 8. Дьяченко А.Ю., Смульский Я.И., Терехов В.И., Ярыгина Н.И. Турбулентное перемешивание возмущений от малой преграды с отрывным сдвиговым

слоем за уступом // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 6. С. 705.

- Neumann J., Wengle H. DNS and LES of Passively Controlled Turbulent Backward Facing Step Flow // Flow, Turbul. Combust. 2003. V. 71. P. 297.
- 10. *Neumann J., Wengle H.* Coherent Structures in Controlled Separated Flow over Sharp-edged and Rounded Steps // J. Turbulence. 2004. V. 5. № 22. 14 p.
- 11. *Kumar S., Vengadesan S.* Control of Separated Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics over a Backward Facing Step // Numer. Heat Transfer. Part A. 2018. V. 73. № 6. P. 366.
- Терехов В.И., Смульский Я.И. Экспериментальное исследование теплообмена при взаимодействии двух отрывных потоков различного масштаба // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 5. С. 156.
- 13. *Park H., Jeon W.-P., Choi H., Yoo J.Y.* Mixing Enhancement behind a Backward-facing Step Using Tabs // Phys. Fluids. 2007. V. 19. № 10. 105103.
- 14. Дьяченко А.Ю., Жданов В.Л., Смульский Я.И., Терехов В.И. Экспериментальное исследование теплообмена в отрывной области за обратным уступом при наличии табов // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 4. С. 549.
- 15. Isaev S.A., Leontiev A.I., Chudnovsky Ya.P., Nikushchenko D., Popov I.A., Sudakov A. Simulation of Vortex Heat Transfer Enhancement in the Turbulent Water Flow in the Narrow Plane-Parallel Channel with an Inclined Oval-Trench Dimple of Fixed Depth and Spot Area // Energies. 2019. V. 12. P. 1296.
- Terekhov V.I., Bogatko T.V. Effect of Dynamic and Thermal Prehistory on Aerodynamic Characteristics and Heat Transfer behind a Sudden Expansion in a Round Tube // Heat Mass Transfer. 2017. V. 53. P. 775.