

УДК 533.9

## УПРАВЛЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕХОДОМ В ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ НА СТЫКЕ ТЕЛ ПОСРЕДСТВОМ ОТСОСА

© 2020 г. Б. Ху<sup>a,b\*</sup>, Х. Чжан<sup>c,\*\*</sup>, М. И. Юнис<sup>d,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University (STDU),  
Shijiazhuang 050043, Hebei, P. R. China

<sup>b</sup> Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province,  
Shijiazhuang 050043, Hebei, P. R. China

<sup>c</sup> Ministry-of-Education Key Laboratory of Fluid Mechanics, School of Aeronautical Science and Engineering,  
Beihang University (BUAA), Beijing, 100191, P. R. China

<sup>d</sup> Department of Mechanical Engineering, Mirpur University of Science and Technology (MUST),  
Mirpur 10250 (AJK), Pakistan

\*E-mail: hubohubo666@163.com

\*\*E-mail: ltszh@buaa.edu.cn

\*\*\*E-mail: myyounis.me@must.edu.pk

Поступила в редакцию 03.07.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 15.11.2019 г.

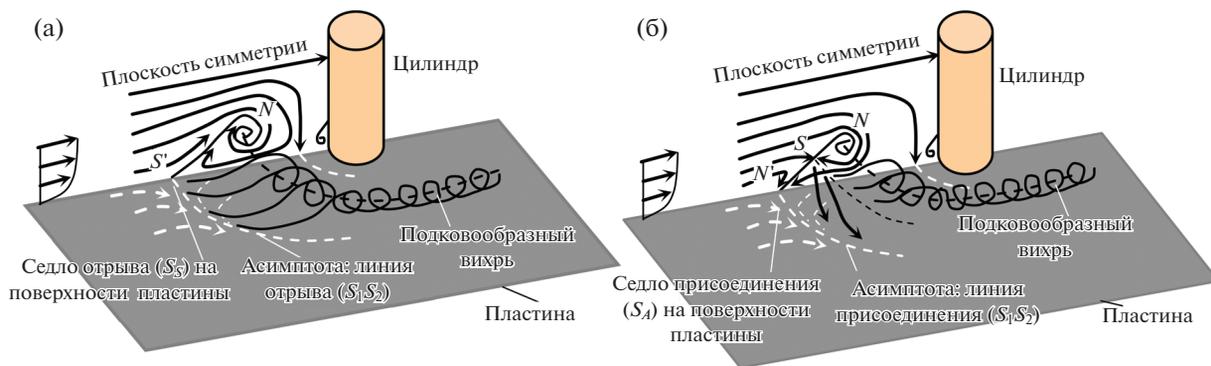
Численно и экспериментально исследовано влияние отсоса на топологический переход в течении на стыке тел. Рассмотрены различные комбинации мест отсоса и изучено влияние расхода отсасываемой жидкости на топологический переход. Отмечается, что в каждом конкретном случае определенная комбинация мест отсоса и объемных расходов жидкости может превратить наиболее удаленную вверх по потоку особую точку системы подковообразных вихрей на поверхности из седла отрыва в седло присоединения. Топологический переход при малых интенсивностях отсоса достигается, когда отверстия отсоса расположены вблизи отрывной зоны. Наилучшее управление этими вихрями достигается, когда область отсоса расположена вблизи стыка при высоких интенсивностях отсоса. Предложенный ранее метод определения мест отрыва и присоединения, основанный на законе сохранения массы, подтвержден результатами моделирования седловых точек на поверхности, как изначальных, так и образовавшихся в результате отсоса. Результаты показывают, что топологический переход (отрыв или присоединение) в каждой седловой точке на стенке может быть точно предсказан по знаку дискриминантного коэффициента  $C_{S/A}$ , включающего местное касательное напряжение  $\tau_w$  на стенке и ширину трубки тока  $n$  вблизи седла.

**Ключевые слова:** отрыв, присоединение, дискриминантный коэффициент, управление отсосом, подковообразный вихрь, течение на стыке тел

**DOI:** 10.31857/S0568528120030068

Течения на стыке тел широко распространены в различных технических приложениях. К ним относятся течения на стыке крыла и фюзеляжа самолета, на стыке лопастей и втулки турбины, здания и поверхности земли, быков моста и русла реки, потоконаправляющих перегородок в теплообменниках [1]. Характерной особенностью течений на стыке тел является образование системы подковообразных вихрей (ПОВ), названных так из-за сходства с подковами. Обычно такие системы возникают, когда набегающий поток пограничного слоя встречает противоположно направленный градиент давления, порожденный присутствием некоторого препятствия, расположенного на поверхности. Течения на стыке тел также включают различные сложные вихревые явления (трехмерный отрыв потока), а для описания соответствующих структур отрыва и присоединения были предложены многочисленные топологические теории.

Поскольку наличие системы ПОВ может существенно повлиять на важные физические параметры в различных приложениях, такие как сопротивление, шум, размывание и теплоперенос, предлагается управление этими вихрями с целью подавить или усилить названные явления, в зависимости от преследуемых технических целей. Изучение поведения систем ПОВ при наличии



**Рис. 1.** Схематическая структура течения и картина линий поверхностного трения в седловой точке отрыва ( $S_S$ , а) и присоединения ( $S_A$ , б) перед стыком [2].

управления вихрями не только поможет проиллюстрировать влияние управления на течения на стыке тел, но и снабдит исследователей данными для развития топологических теорий, позволяющих понять механизм вышеупомянутого трехмерного отрыва.

В течении на стыке тел наиболее удаленная топологическая особенность на поверхности пластины называется седловой точкой ( $S$ ). Она традиционно рассматривается как начало отрыва и называется седлом отрыва ( $S_S$ ) [2], как показано на рис. 1а. В плоскости симметрии особенность, соответствующая  $S_S$ , представляет собой половину седла ( $S'$ ), а ближняя жидкость отрывается от стенки и закручивается в системе ПОВ. Асимптота  $S_1S_2$ , исходящая из точки  $S_S$ , на стенке обычно считается линией отрыва.

Однако седло на стенке может быть и седлом присоединения ( $S_A$ ), как показано на рис. 1б; до сих пор подобные особенности мало исследованы [3]. В плоскости симметрии такая особенность соответствует половине узла ( $N'$ ), а ближняя жидкость присоединяется к стенке, проходя через пространственное седло  $S$ . В этом случае асимптота  $S_1S_2$ , исходящая из точки  $S_A$ , на стенке представляет собой линию присоединения. Обе картины течения в плоскости симметрии, показанные на рис. 1, удовлетворяют топологическим требованиям, сформулированным в работах [4, 5]. Отрыву или присоединению в наиболее удаленной особой точке соответствуют различные траектории трубок тока и соответственно различные способы переноса завихренности (и массы) и локализации набегающего пограничного слоя (вносится или нет завихренность в систему ПОВ). Присоединение не следует рассматривать лишь как явление, обратное отрыву [3], но механизм, определяющий отрыв или присоединение в наиболее удаленной особой точке, и соотношение между ними требуют дальнейших глубоких исследований.

В ряде работ [6–11] рассмотрены седла отрыва и присоединения  $S_S$  и  $S_A$  и определены для них дискриминантные критерии. В работах [12, 13] асимптота  $S_1S_2$  рассматривается как линия отрыва, а сам отрыв интерпретируется с точки зрения сохранения массы. Утверждалось, что отрыв потока от стенки происходит, когда ширина трубки тока  $n$  и касательное напряжение  $\tau_w$  на стенке уменьшаются по мере приближения к асимптоте  $S_1S_2$ . Эта концепция проста для понимания и широко используется в технических приложениях. Поскольку математически доказано, что сходимости линий поверхностного трения есть необходимое, но не достаточное условие отрыва [6], эта концепция в дальнейшем совершенствовалась и была также применена для объяснения явления присоединения потока [14].

Существование присоединения потока в точке  $S_A$  при различных условиях было первоначально показано в вычислительном анализе. В работе [15] было численно продемонстрировано существование точки  $S_A$  в стационарных и нестационарных ламинарных течениях на стыках тел и отмечено, что схождение линий постоянного поверхностного трения не обязательно приводит к отрыву потока. В указанной работе отмечается, что различные пространственные структуры течения могут оставлять одинаковые следы (или отпечатки) на поверхностях. Далее в различных численных исследованиях течений на стыке тел [16–18] было установлено, что топология типа  $S_A$  существует в широком диапазоне условий течения, включая ламинарные и турбулентные, дозвуковые и сверхзвуковые течения. Наличие седловой точки присоединения было также уста-

новлено для случая взаимодействия струи с поперечным потоком, аналогичного по структуре течению на стыке тел [19].

Топология типа  $S_S/S_A$  наблюдалась также в экспериментах. В экспериментах [20] необычная топология  $S_A$  наблюдалась при помощи лазерного светового ножа и визуализации с длительной экспозицией. Однако пространственное разрешение было недостаточно, чтобы идентифицировать детали топологии течения. В работах [2, 21] существование  $S_A$  проверено методом измерения скорости по изображениям частиц (PIV) и предложены некоторые топологические структуры подковообразных вихрей, соответствующие наиболее удаленной особенности  $S_S/S_A$ . В [22, 23] экспериментально исследовано влияние свободного конца препятствия конечной высоты на топологический переход в течениях на стыке с телом небольшого удлинения. В [14, 24] существование  $S_A$  экспериментально подтверждено посредством метода PIV с высоким разрешением и проведено параметрическое исследование топологического перехода между  $S_S$  и  $S_A$ , при помощи которого был предложен дискриминантный критерий, основанный на интерпретации отрыва потока, предложенной Лайтхиллом.

Хотя за последние десятилетия выполнено большое количество работ, механизм топологического перехода между  $S_S$  и  $S_A$  и перехода между отрывом и присоединением потока требует дальнейших исследований. Более того, критерий, предложенный в [14] на основе идей Лайтхилла, также нуждается в подтверждении. В настоящей работе для изменения местного поверхностного трения используется отсос жидкости и исследуется соотношение между топологическим переходом  $S_S-S_A$  и поверхностным трением. Отсос представляет собой один из классических методов управления потоками, широко используемый для управления пограничным слоем [25–30] и ламинарным переходом [31]. В данной работе отсос используется для активного управления отрывом и присоединением потока в наиболее удаленной особой точке ПОВ посредством симметричного размещения пары отверстий отсоса в различных положениях перед стыком; при этом проводится наблюдение топологического перехода между  $S_S$  и  $S_A$ . Влияние расположения отверстий отсоса и объемного расхода отсасываемой жидкости исследуется экспериментально и численно. Наконец, для разных типов топологий течения проанализировано количественное соотношение между поверхностным трением и предельными линиями тока и проверен критерий, предложенный в [14].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОДЫ

### 1.1. Экспериментальная установка и метод

Эксперименты были проведены в гидроканале с поперечным сечением  $0.04 \times 0.04$  м и длиной 2 м. Скорость потока в канале могла непрерывно меняться от 0 до 0.5 м/с. Плоская пластина была помещена на расстоянии 10 см над дном канала; на ней развивался ламинарный пограничный слой с профилем Блазиуса [24]. Стык был образован размещением на пластине конечного квадратного цилиндра на расстоянии 0.02 м вниз по потоку от передней кромки пластины, как показано на рис. 2. Длина стороны цилиндра  $W = 0.08$  м, а высота цилиндра равна  $h$ . Отсос осуществлялся через два отверстия диаметром 0.004 м, находящимися вблизи плоскости симметрии на расстоянии  $l_z$  от нее и на расстоянии  $l_x$  вверх по потоку от стыка.

Для изучения влияния отсоса на топологию течения имелись три пары отверстий в различных позициях. Первая пара отверстий отсоса  $H_1$  была помещена на линии отрыва/присоединения  $S_1S_2$ , где расстояние  $l_x$  было равно 0.09 м (1.125*W*), а  $l_z$  равно 0.015 м (0.1875*W*). Две другие пары отверстий находились в зоне отрыва, также на расстоянии  $l_z = 0.015$  м (0.1875*W*). Вторая пара отверстий  $H_2$  была помещена на линии вторичного присоединения между двумя первичными вихрями (вторичный вихрь часто образуется между двумя первичными вихрями, а его отпечатками на поверхности являются линии вторичного отрыва и присоединения) на расстоянии  $l_x = 0.05$  м (0.625*W*). Третья пара отверстий  $H_3$  была размещена между первым первичным вихрем ( $N$  на рис. 1) и препятствием, на расстоянии  $l_x = 0.02$  м (0.25*W*).

Вода откачивалась из канала через отверстия отсоса и присоединенные к ним трубки благодаря сифонному эффекту, как показано на рис. 3. Перепад высот между отверстиями и выходными сечениями трубок позволял проводить непрерывное откачивание воды с расходом в диапазоне от 0 до  $7.5 \times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с. При помощи клапанов реализовывались различные интенсивности отсоса через каждую пару отверстий (0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 1.1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6 и  $7.5 \times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/(с\*отверстие)) и возникало течение на стыке.

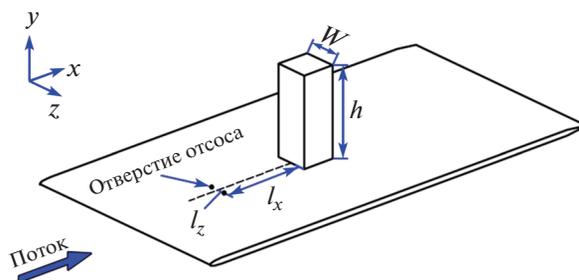


Рис. 2. Схематическое изображение стыка между прямоугольным препятствием и пластиной и отверстия отсоса.

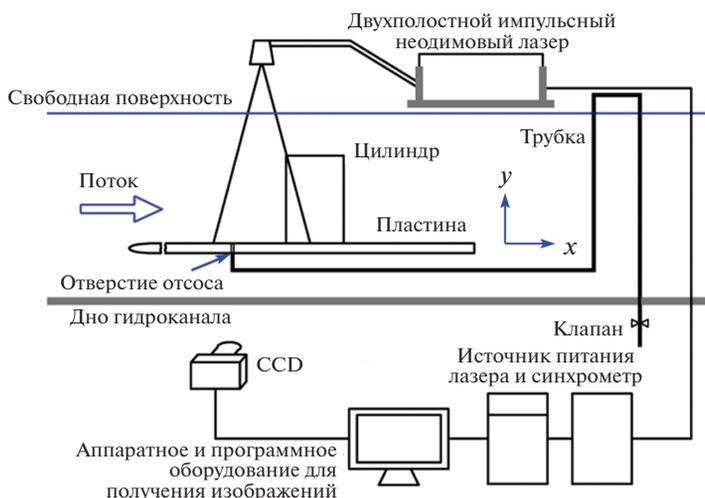


Рис. 3. Экспериментальная установка для PIV-измерений.

На рис. 3 также показана двумерная система измерений скорости по изображениям частиц (PIV), состоящая из двухполостного импульсного неодимового лазера мощностью 200 мДж/импульс и продолжительностью импульса  $\Delta t$  от 200 до 600 нс, кронштейна с направляющей лазерного луча, лазерного синхронизатора импульсов и камеры с зарядовой связью с пространственным разрешением  $2448 \times 2050$  пикселей (5 мегапикселей) и максимальной частотой выборки данных 15 кадров в секунду. Для получения более детального изображения структуры течения также использовалась макролинза F2.8 EX DG с фокусным расстоянием 105 мм. Вода засеивалась частицами окиси алюминия  $Al_2O_3$  диаметром 400 нм и удельной плотностью примерно 3.4–4; было проверено, что частицы хорошо отслеживают траектории жидкости и что они входят в область течения на стыке, где скорости жидкости чрезвычайно малы [24].

Эксперименты были проведены при скорости потока в канале 0.028 м/с; при этом в том месте, где находилась передняя кромка цилиндра, толщина пограничного слоя  $\delta = 13.7$  мм. Числа Рейнольдса, определенные по ширине препятствия  $W$  и по  $\delta$  были соответственно  $Re_W \approx 2124$  и  $Re_\delta \approx 365$ . Объемный расход жидкости в набегающем пограничном слое через площадь, равную площади лобовой поверхности препятствия, был равен примерно  $20 \times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, согласно вычислению интеграла от профиля Блазиуса в пограничном слое.

При помощи метода PIV создавались два массива данных, а именно, суммарный и увеличенный массивы. Первый из них включает всю систему ПОВ, простирающуюся на расстояние примерно  $1.3W$  в продольном направлении, а второй содержит данные, касающиеся поля течения в наиболее удаленной особенной точке, на расстоянии примерно  $0.5W$  в продольном направлении. Окно опроса имело размеры  $64 \times 16$  пикселей, а шаг опроса был  $16 \times 8$  пикселей. Максимальное разрешение визуализированного поля течения было  $0.25 \times 0.125$  мм при частоте опроса 5 Гц. Наложение 90 PIV изображений позволяло воспроизвести траектории частиц и диагности-

ровать топологию течения. Неопределенность данных по скорости была менее 2%. Все суммарные PIV данные, представленные в разделе 2.1, были подтверждены сравнением с подробными данными и траекториями частиц. Более детальное описание экспериментальной установки и метода содержится в работе [24].

### 1.2. Вычислительный метод

Дополнительно к двумерной PIV визуализации течения (в плоскости симметрии) и для демонстрации трехмерных вихревых структур в течении на стыке тел использовалось численное моделирование. Моделирование несжимаемого течения на стыке тел в условиях, аналогичных экспериментальным, проводилось при помощи коммерческого пакета ANSYS®.

На верхнем конце препятствия ставились граничные условия симметрии для исключения влияния свободного конца цилиндра. Влияние отсоса моделировалось заданием отрицательной скорости на входе в отверстие отсоса. Вокруг препятствия и пластины строилась структурированная сетка при минимальном расстоянии от стенки до первого слоя сеточных узлов, равном примерно  $0.0005W$  ( $W$  – ширина препятствия). Более мелкие сетки строились вблизи отверстий отсоса, для того чтобы уловить изменения скорости потока.

Нестационарное течение, связанное с отрывом и присоединением, моделировалось с использованием модуля расчета нестационарных пограничных слоев, основанного на процедуре SIMPLE определения соотношения между давлением и скоростью, противопоточной схеме дискретизации второго порядка и вычислению градиентов параметров по ячейкам. Сравнение численных и экспериментальных результатов показывает, что численные результаты, полученные на сетках с более чем тремя миллионами ячеек, хорошо согласуются с экспериментальными данными [14]. Более детально особенности вычислительного процесса описаны в [14].

При постобработке численных данных строились предельные линии тока и определялись касательные напряжения на стенке. При помощи этих результатов анализировались соотношения между пространственными топологическими структурами и их отпечатками на стенке и между касательными напряжениями на стенке и явлениями отрыва и присоединения.

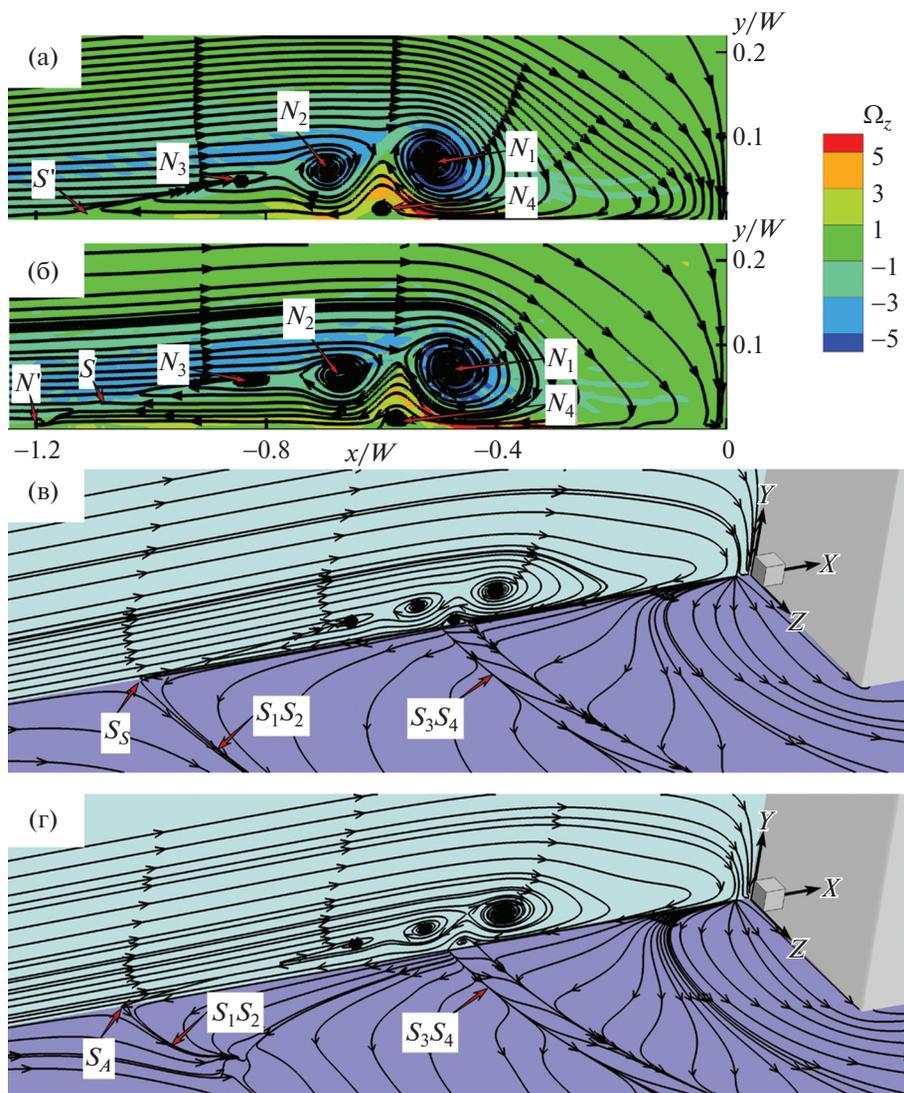
## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние отсоса на топологию наиболее удаленной особой точки и суммарной системы подковообразных вихрей (ПОВ) исследовано экспериментально (методом PIV) и численно. Результаты, полученные методом PIV, иллюстрируют топологические картины в плоскости симметрии на стыке тел, а рассчитанные картины предельных линий тока позволяют лучше понять соотношения между пространственными топологиями и их отпечатками на поверхности.

Стратегия управления посредством отсоса включает в себя изменение физических параметров, а именно, положений отверстий отсоса и расходов через них (интенсивностей отсоса). Отсос может повлиять на систему ПОВ различными путями; в частности, возможно управление при помощи отсоса [26]. Здесь мы рассматриваем лишь влияние отсоса на топологический переход в наиболее удаленной вверх по потоку особой точке стационарной ламинарной системы ПОВ. На основе экспериментальных и численных результатов тестируется метод предсказания отрыва и присоединения в наиболее удаленной вверх по потоку особой точке и оценивается его правильность сравнением с методом, предложенным в [14].

### 2.1. Управление топологическим переходом путем отсоса

Пространственная топология, следующая из PIV измерений в плоскости симметрии при отсутствии отсоса, представлена на рис. 4а, а соответствующие результаты моделирования приведены на рис. 4в. Хорошо видны три первичных вихря, вращающиеся по часовой стрелке ( $N_1$ ,  $N_2$  и  $N_3$ ), и вторичный вихрь  $N_4$ , вращающийся против часовой стрелки и расположенный между  $N_1$  и  $N_2$ . Видна наиболее удаленная вверх по потоку особая точка; ее топология в плоскости симметрии соответствует половине седла отрыва ( $S'$ ). Таким образом, наиболее удаленная седловая точка на стенке, показанная на рис. 4в, есть седло отрыва ( $S_S$ ). На рис. 4б показано влияние отсоса на топологию в наиболее удаленной точке для случая, когда отверстия отсоса расположены на асимптоте  $S_1S_2$  (пара отверстий  $H_1$ ,  $l_x = 1.125W$ ) и объемный расход через каждое отверстие составляет  $0.3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (средняя скорость потока через отверстие отсоса равна  $0.024 \text{ м/с}$ ). Топология *outermost* в пространстве изменяется от половины седла отрыва ( $S'$ ) к половине узла при-

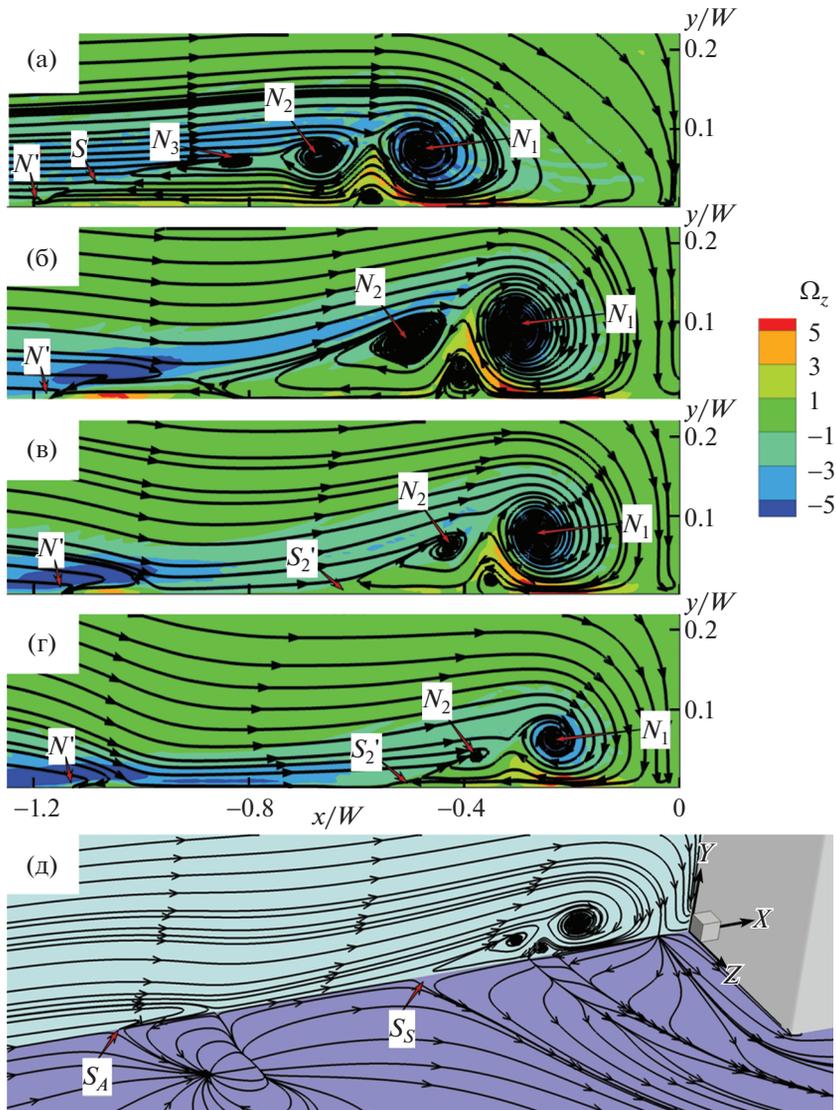


**Рис. 4.** Топологические структуры в плоскости симметрии, полученные экспериментально, и аналогичные структуры в плоскости симметрии и на стенке, полученные при моделировании: (а) экспериментальные результаты без отсоса (наиболее удаленная особенность – половина седла отрыва  $S'$ ); (б) экспериментальные результаты при отверстиях отсоса, расположенных на линии  $S_1S_2$  при интенсивности отсоса  $0.3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (наиболее удаленная особенность – половина узла присоединения  $N'$ ); (в) топологии течения в плоскости симметрии и на стенке, полученные при моделировании для условий, соответствующих случаю (а); (г) топологии течения в плоскости симметрии и на стенке, полученные при моделировании для условий, соответствующих случаю управления (б).

соединения ( $N'$ ), исходящего из пространственного седла  $S$ . Изменения в общей структуре ПОВ для этих двух случаев практически незаметны.

На рис. 4в и 4г представлены рассчитанная картина пространственных линий тока в плоскости симметрии и соответствующая картина предельных линий тока для экспериментальных условий, соответствующих рис. 4а и 4б. Так же как и в случае PIV измерений, наблюдаются три первичных вихря, вращающихся по часовой стрелке, и один вторичный вихрь, вращающийся против часовой стрелки (рис. 4в и 4г). За исключением области, непосредственно прилегающей к отверстию отсоса, картина предельных линий тока при наличии отсоса (рис. 4г) практически та же, что и при отсутствии отсоса (рис. 4в). Наиболее удаленное седло на стенке в случае, когда имеет место отсос (рис. 4г), соответствующее  $N'$  на рис. 4б, есть седло присоединения  $S_A$ .

Вышеприведенные результаты показывают, что топология в наиболее удаленной особой точке может быть изменена от отрыва к присоединению путем отсоса, приложенного в надлежном



**Рис. 5.** Топологические структуры, наблюдаемые при расположении отверстий отсоса на первоначальной линии  $S_1S$  при интенсивностях отсоса (а)  $0.3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (б)  $2 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (в)  $4 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (г)  $7.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ; случай (д) соответствует полученным при моделировании трехмерным топологическим картинам в плоскости симметрии и на стенке для условий, соответствующих случаю (в).

месте и при соответствующем объемном расходе жидкости. При различных комбинациях местоположений и интенсивностей отсоса общая структура ПОВ изменяется вместе с топологическим переходом в наиболее удаленной особой точке, что подробно обсуждается ниже.

Влияние местоположения и интенсивности отсоса на наиболее удаленную особую точку и на общую структуру ПОВ изучается на основе PIV измерений и рассчитанных картин течения, полученных при трех положениях отверстий отсоса. Эти отверстия расположены следующим образом. Вариант 1: отверстия расположены на линии отрыва/присоединения  $S_1S_2$ , образующейся в отсутствие отсоса; в этом случае они называются  $N_1$ . Вариант 2: отверстия расположены на линии вторичного присоединения  $S_3S_4$ , образующейся в отсутствие отсоса; в этом случае они называются  $N_2$ . Наконец, вариант 3: отверстия расположены между линией  $S_3S_4$  и препятствием, ниже по потоку от системы ПОВ; в этом случае они называются  $N_3$ .

На рис. 5а–5г сравниваются картины ПОВ в плоскости симметрии для варианта 1 при различных интенсивностях отсоса от  $0.3 \times 10^{-6}$  до  $7.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ . В данном положении отсос наиболее

сильно влияет на топологию в наиболее удаленной особой точке, где при всех интенсивностях отсоса образуется полуузел присоединения  $N'$ .

При малых интенсивностях отсоса  $0.3\text{--}0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 5а, где представлена та же ситуация, что и на рис. 4б) количество и интенсивность вихрей остаются практически такими же, что и в базовом случае, т.е. без отсоса (рис. 4а). Картины линий тока в области входа трубок тока, заканчивающейся в полуузле присоединения  $N'$ , показывают, что жидкость или завихренность, входящие в этот узел, имеют два источника, а именно, нижнюю часть пограничного слоя выше по потоку от зоны отрыва и верхнюю часть пограничного слоя. С увеличением интенсивности отсоса до  $2 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 5б) завихренность, вносимая в систему ПОВ, уменьшается и, в свою очередь, масштабы и интенсивности первичных вихрей  $N_1$  и  $N_2$  существенно меняются, а вихрь  $N_3$  полностью исчезает (ср. рис. 5а и 5б). При промежуточных интенсивностях отсоса между  $0.6 \times 10^{-6}$  и  $1.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  имеет место нестационарная картина течения (не показана здесь), что, вероятно, связано с поочередным появлением и исчезновением  $N_3$ . Аналогичным образом при указанных интенсивностях отсоса завихренность, поступающая в систему ПОВ из пограничного слоя, становится недостаточной, чтобы поддержать существование крупномасштабной отрывной зоны, так что эта зона постепенно распадается на две области, как показано на рис. 5б.

Дальнейший рост интенсивности отсоса приводит к образованию двух отдельных отрывных зон, внутренней и внешней (рис. 5в). Отпечаток внутренней отрывной зоны, расположенной вблизи препятствия (рис. 5д), аналогичен отпечатку в случае отсутствия отсоса (рис. 4в). Топология в наиболее удаленной особой точке внутренней системы ПОВ, показанная на рис. 5в, соответствует полуседлу отрыва ( $S'_2$ , где индекс 2 означает, что точка принадлежит внутренней отрывной зоне), а отпечаток представляет собой седло отрыва  $S_s$  (рис. 5д). Таким образом, дальнейшее увеличение объемного расхода жидкости, например, от  $4 \times 10^{-6}$  до  $7.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  на рис. 5в и 5г соответственно, не приводит к значительному топологическому переходу, но уменьшает размеры и интенсивности вихрей в системе ПОВ.

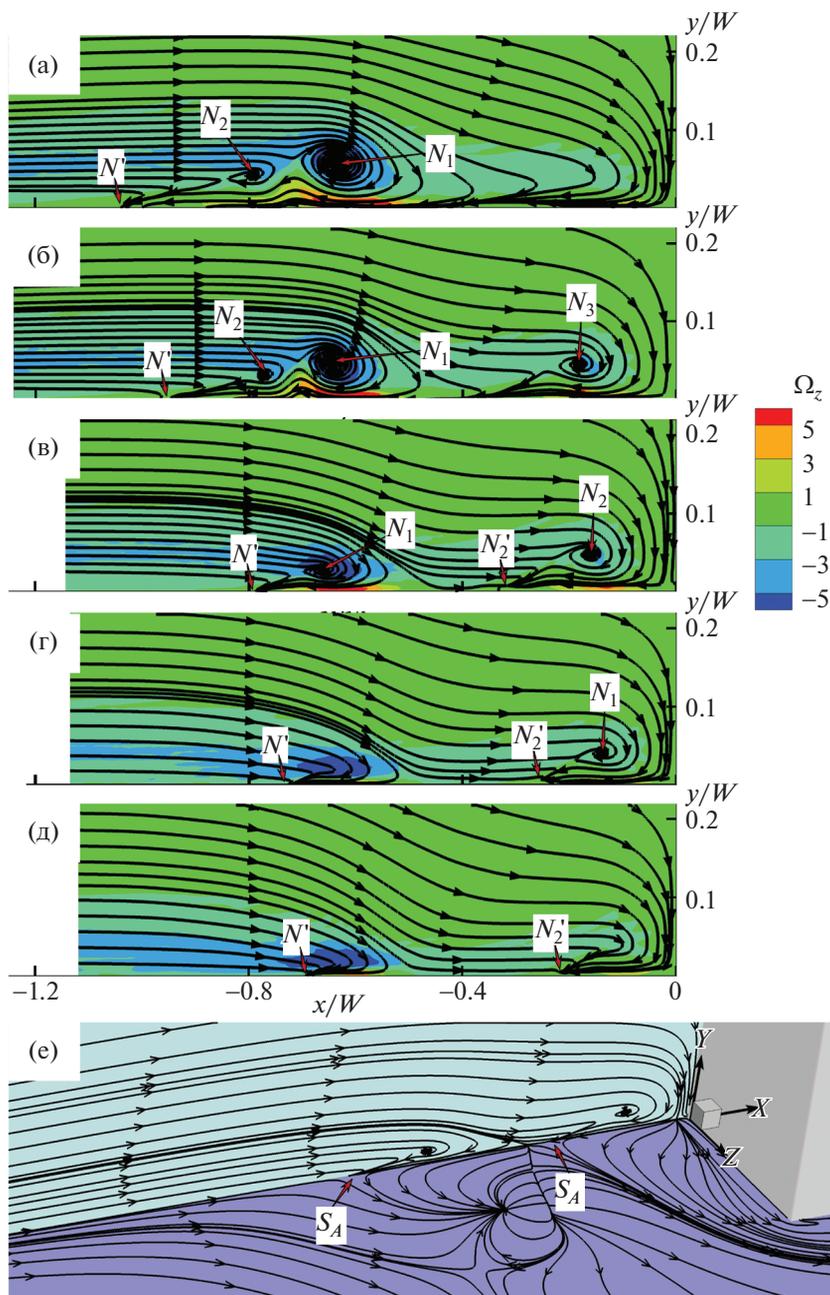
На рис. 6 представлены результаты, соответствующие варианту 2 (отверстия отсоса расположены на линии вторичного присоединения  $S_3S_4$  в варианте без отверстий отсоса) при тех же интенсивностях отсоса, что и в варианте 1. Топология наиболее удаленной особенности соответствует присоединению, где  $N'$  – расположенная выше других по потоку особая точка в плоскости симметрии из всех рассмотренных случаев. При этом расположении отсос имеет более непосредственное влияние на перенос завихренности к первичным вихрям, чем в варианте 1. Нестационарные картины колебаний и слияний в системе ПОВ наблюдаются при объемных расходах отсасываемой жидкости в диапазоне от 0.3 до  $0.4 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (здесь не приведены). При дальнейшем увеличении интенсивности отсоса система ПОВ возвращается к стационарному состоянию и сводится к двум первичным вихрям  $N_1$  и  $N_2$ , как показано на рис. 6а. Топология наиболее удаленной особенности также преобразуется от первоначального отрыва  $S'$  (рис. 4а) к присоединению  $N'$  (рис. 6а).

Рост интенсивности отсоса разделяет зону отрыва на две зоны (рис. 6б–6д), аналогично тому, как это было ранее отмечено на рис. 5б–5г. Однако отсос в различных местах приводит к различным распределениям завихренности выше и ниже по потоку от отверстий отсоса. В свою очередь это приводит к образованию различных топологических картин в этих двух областях.

Вариант 2 при интенсивности отсоса  $1.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  представлен на рис. 6б; находящаяся выше по потоку отрывная зона обширнее, чем расположенная ниже по течению (ближе к окрестности угла). По сравнению с вариантом 1, это совершенно отличная структура течения в ПОВ. Отрывная зона, расположенная выше по потоку, содержит два первичных вихря, а зона, расположенная ниже по течению, один первичный вихрь. Таким образом, общее число первичных вихрей в системе ПОВ увеличивается по сравнению со случаем, когда интенсивность отсоса была  $0.7 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 6а). В обеих отрывных зонах наиболее удаленная вверх по потоку особая точка является точкой присоединения типа  $N'_2$  (рис. 6б).

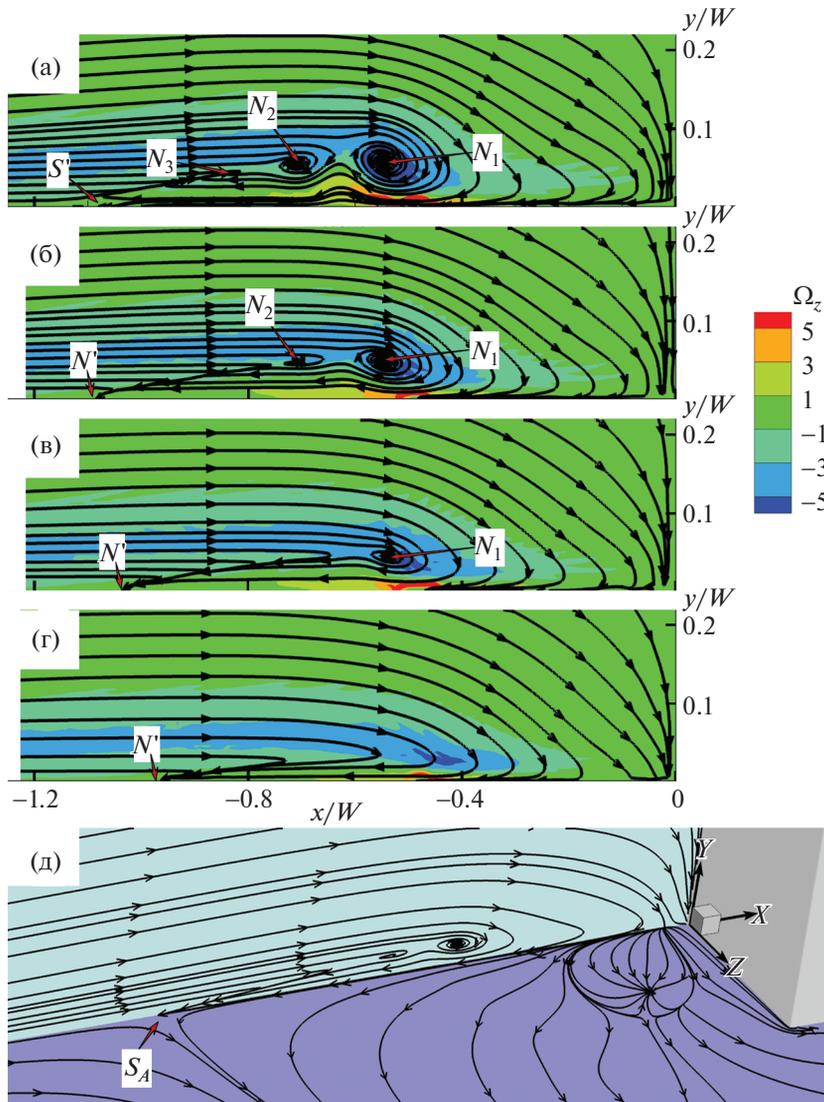
Увеличение интенсивности отсоса до  $3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  приводит к уменьшению числа вихрей. В расположенной выше по потоку отрывной зоне система парных вихрей превращается в систему единичного вихря, а интенсивность и распространение нижнего вихря несколько уменьшаются (ср. рис. 6б и 6в).

Постоянный рост отсоса существенно сужает обе зоны отрыва (см. рис. 6в–6д). Наиболее удаленная особая точка во внутренней зоне отрыва имеет при этом тип  $N'_2$ . При интенсивности отсоса  $7.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  первичные вихри не наблюдаются, а обе области отрыва уменьшаются до



**Рис. 6.** Топологические структуры, наблюдаемые при расположении отверстий отсоса на первоначальной линии  $S_3S_4$  при интенсивностях отсоса (а)  $0.7 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (б)  $1.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (в)  $3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (г)  $5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (д)  $7.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , случай (е) соответствует полученным при моделировании трехмерным топологическим картинам в плоскости симметрии и на стенке для условий, соответствующих случаю (в).

весьма малых размеров (рис. бд). Из результатов PIV измерений следует, что при изменении интенсивности отсоса в варианте 2 особенности в наиболее удаленных вверх по потоку точках имеют тип присоединения в плоскости симметрии в обеих (расположенных выше и ниже по течению) зонах отрыва. На рис. бв приведены полученная при моделировании картина предельных линий тока и пространственная структура течения в плоскости симметрии для интенсивности отсоса  $3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. бв). На стенке можно видеть два седла присоединения  $S_A$ , а две отрывные области находятся вдали от отверстий отсоса. Пространственные картины предельных линий тока, полученные при PIV измерениях (рис. бв), и аналогичные рассчитанные картины (рис. бе)



**Рис. 7.** Топологические структуры, наблюдаемые при расположении отверстий отсоса между первоначальной линией  $S_3S_4$  и препятствием при интенсивностях отсоса (а)  $0.7 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (б)  $2 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (в)  $2.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ , (г)  $4 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ; случай (д) соответствует полученным при моделировании трехмерным топологическим картинам в плоскости симметрии и на стенке для условий, соответствующих случаю (б).

находятся в хорошем соответствии. Предельные линии тока на стенке имеют ту же структуру, что и на рис. 16.

Влияние отсоса через третью пару отверстий (вариант 3) на топологию в наиболее удаленной особой точке и систему ПОВ показано на рис. 7. В этом случае положения отверстий отсоса были удалены от наиболее удаленных особых точек, по сравнению с вариантами 1 и 2. Большое расстояние между отверстиями отсоса и наиболее удаленной вверх по потоку особой точкой приводит к тому, что влияние отсоса на топологию течения в этом случае оказывается слабее, чем в вариантах 1 и 2. Особенность в наиболее удаленной точке имеет тип отрыва  $S'$  в широком диапазоне интенсивностей отсоса ( $0.3\text{--}1.5 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ ), как показано на рис. 7а. При дальнейшем увеличении интенсивности отсоса количество первичных вихрей в системе ПОВ постоянно уменьшается от трех (рис. 7а) до нуля (рис. 7г), а тип наиболее удаленной особой точки меняется от  $S'$  к  $N'$  (рис. 7а–7г). На рис. 7д показана полученная в расчетах картина предельных линий тока при тех же условиях, что и на рис. 7б. На стенке имеет место седло присоединения  $S_A$ , а отпечаток

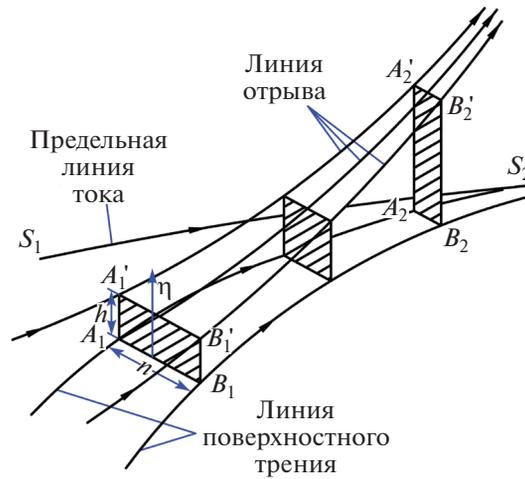


Рис. 8. Схематическое изображение трубки тока, построенной для предсказания отрыва потока [13].

на стенке вдали от отверстий отсоса аналогичен случаю, когда отсос отсутствует (рис. 1). При всех интенсивностях отсоса система ПОВ остается стационарной.

2.2. Предсказания отрыва и присоединения, основанные на полученных при моделировании полях течения вблизи наиболее удаленного седла на стенке

Лайтхилл рассматривал отрыв и присоединение потока с точки зрения сохранения массы и эта простая интерпретация особенно широко распространена в практических технических сценариях приложениях по сравнению с другими существующими объяснениями [6–13]. В работе [14] интерпретация Лайтхилла расширена и введен дискриминантный коэффициент для предсказания отрыва либо присоединения в течении на стыке тел.

В той же работе [14] предложено использовать данные моделирования течений вблизи наиболее удаленного седла на стенке для тестирования топологического критерия, введенного в [14] для предсказания отрыва либо присоединения. Предварительно кратко обсудим этот критерий.

Согласно теории Лайтхилла, вблизи линии отрыва  $S_1S_2$ , исходящей из седловой точки на рис. 8, строится прямоугольная трубка тока [13]. Эта трубка состоит из двух соседних предельных линий тока  $A_1A_2$  и  $B_1B_2$  и соответствующих им линий поверхностного трения  $A_1A_2$  и  $B_1B_2$ . Принимается, что трубка тока настолько мала, что местные векторы скорости образуют линейный профиль и почти параллельны стенке (область, весьма близкая к особой точке (как  $A_S$  на рис. 9), где эти условия не выполнены, исключается из рассмотрения). Если  $n$  – ширина двух смежных предельных линий, а  $h$  – высота трубки тока, то поток массы через трубку тока рассчитывается по формуле  $\dot{m} = \rho \bar{u} h n = \text{const}$ , где  $\rho$  – плотность жидкости, а  $\bar{u} \left( = \frac{1}{2} u_{\eta=h} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} \cdot h \right)$  – средняя по сечению скорость. Результирующее поверхностное трение на стенке рассчитывается по формуле  $\tau_w = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)_{\eta=0}$ , где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, постоянный в данной работе.

Тогда поток массы можно записать в виде  $\dot{m} = \frac{h^2 n \tau_w}{2\nu} = \text{const}$ , где  $\nu = \mu/\rho$  – кинематический коэффициент вязкости. Следовательно, мы имеем

$$h = \left( \frac{C}{n \tau_w} \right)^{1/2} \tag{2.1}$$

Уравнение (2.1) показывает, что высота трубки тока  $h$  определяется не  $n$  или  $\tau_w$  по отдельности, но их произведением. Если это произведение возрастает, то  $h$  убывает и произойдет присоединение потока; в противном случае  $h$  возрастает и поток отрывается.

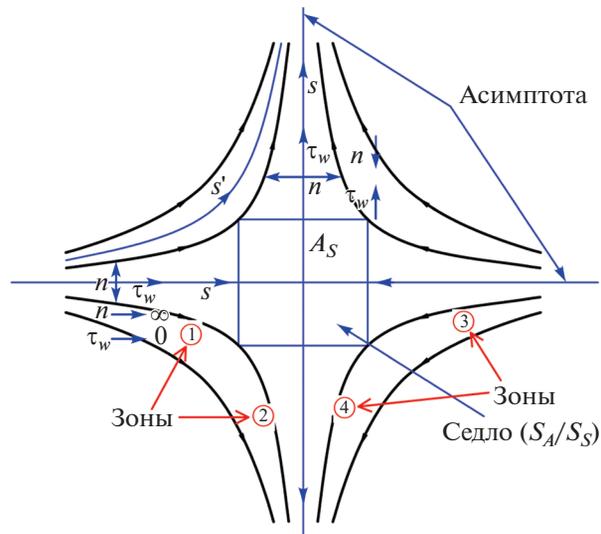


Рис. 9. Вид сверху картины линий поверхностного трения вблизи седла на стенке [14].

Таким образом, изменение данного произведения вдоль линии тока может быть критерием того, оторвется ли стационарный поток от стенки или присоединится к ней. В одномерной криволинейной системе координат (система координат  $s$ ) с осью  $s$ , направленной по линии результирующего поверхностного трения в заданной трубке тока и положительным направлением оси  $s$  вниз по течению, величины  $n$  и  $\tau_w$  могут быть представлены в виде положительных скаляров, и мы имеем

$$C_{S/A} = \frac{d(n\tau_w)}{ds} = \tau_w \frac{dn}{ds} + n \frac{d\tau_w}{ds} \quad (2.2)$$

Если  $C_{S/A} > 0$ , то произведение  $n$  и  $\tau_w$  растет, а  $h$  убывает; жидкость течет вниз и присоединяется к стенке. Если  $C_{S/A} < 0$ , то  $h$  возрастает вдоль линии тока; жидкость поднимается и отходит от стенки, а отрыв происходит тогда, когда жидкость сворачивается в пространстве. Если же  $C_{S/A} = 0$ , то имеем критическую ситуацию, когда жидкость движется параллельно стенке.

На рис. 9 представлен вид сверху седла на стенке ( $S_A$  или  $S_S$ ). В седле поверхностное трение  $\tau_w$  равно нулю; выше по потоку от седла (зоны 1 и 3 на рис. 9)  $\tau_w$  убывает ( $\frac{d\tau_w}{ds} < 0$ ), а  $n$  возрастает ( $\frac{dn}{ds} > 0$ ); ниже по потоку от седла (зоны 2 и 4 на рис. 9)  $\tau_w$  возрастает ( $\frac{d\tau_w}{ds} > 0$ ), а  $n$  убывает ( $\frac{dn}{ds} < 0$ ). Поскольку градиенты  $n$  и  $\tau_w$  имеют противоположные знаки,  $C_{S/A}$  может быть положительным, отрицательным или нулевым, так что седловая точка может иметь один из трех возможных типов, а именно,  $S_A$ ,  $S_S$  или критический.

В квадранте области, прилегающей к седлу, (зоны 1 и 2 или зоны 3 и 4 на рис. 9) возможны четыре картины течения в трубке тока: строго последовательный отрыв, строго последовательное присоединение, переход от отрыва к присоединению и переход от присоединения к отрыву [14]. Картины течения в двух квадрантах могут быть одинаковы и различны. Строго последовательные отрыв или присоединение во всех четырех зонах определяются как сильный отрыв ( $S_S$ ) или сильное присоединение ( $S_A$ ). Сравнения между картинами течения и знаками коэффициентов согласуются с критерием, предложенным в [14].

В настоящей работе стратегия управления отсосом используется для изменения распределений по стенке величин  $n$  и  $\tau_w$ , входящих в коэффициент  $C_{S/A}$ , с целью тестирования вышеупомянутого критерия. Изменения  $n$  и  $\tau_w$  при топологическом переходе от  $S_S$  к  $S_A$ : представлены на рис. 4–7; отсос, приложенный на линии  $S_1S_2$ , непосредственно вызывает изменение величин  $\tau_w$

**Таблица 1.** Сравнение наиболее удаленных топологических картин течения со знаком коэффициента  $C_{S/A}$  по данным численного моделирования поля течения

Положение отверстия отсоса	Интенсивность отсоса ( $\times 10^{-6}$ м <sup>3</sup> /с)	Топология в плоскости симметрии	Седло на стенке	Знак $C_{S/A}$
—	—	$S'$	$S_S$	—
$H_1$	0.3	$N'$	$S_A$	+
$H_1$	4	$N'$	$S_A$	+
		$S'$	$S_{S2}$	—
$H_1$	6	$N'$	$S_A$	+
		$S'$	$S_{S2}$	—
$H_2$	1.5	$N'$	$S_A$	+
$H_2$	5	$N'$	$S_A$	+
		$N'$	$S_{A2}$	+
$H_3$	2.5	$N'$	$S_A$	+
$H_3$	4	$N'$	$S_A$	+

и  $n$  вблизи седла, тогда как отсос в двух других положениях влияет на эти параметры вблизи седла косвенным образом.

Далее при последующей обработке численных решений была построена сетка, состоящая из линий поверхностного трения и ортогональных к ним линий, с целью получить данные о местном касательном трении  $\tau_w$  на стенке и ширине трубки тока  $n$  вблизи каждого седла, как при наличии, так и при отсутствии отсоса. Эти данные были затем использованы для вычисления дискриминантного коэффициента  $C_{S/A}$ , входящего в критерий.

В табл. 1 представлены результаты анализа некоторых седловых точек на стенке и соответствующие им картины течения. Во всех случаях картина течения, определенная по дискриминантным коэффициентам  $C_{S/A}$ , согласуется с картиной отрыва или присоединения предельных линий тока вблизи седла. Всем картинам течения, представленным в таблице, присущи либо сильный отрыв, либо сильное присоединение. Изменение знака коэффициента вблизи наиболее удаленной особой точки означает изменение в распределении местного поверхностного трения. Индекс 2 в  $S_S$  или  $S_A$  означает, что данное седло есть наиболее удаленное седло на стенке во внутренней отрывной зоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние отсоса на топологическую структуру подковообразного вихря (ПОВ) в течении на стыке тел исследовалось экспериментально методом PIV и путем численного моделирования. Подробно изучены изменения в пространственном поле течения и поверхностном трении, вызванные отсосом. Проанализировано соотношение между пространственными топологиями отрыва и присоединения и картинами поверхностного трения.

Наиболее удаленная особая точка претерпевает переход от отрыва к присоединению при приложении отсоса с нужной интенсивностью в подходящем месте. Приложение отсоса вносит некоторые изменения непосредственно в локальный перенос массы и завихренности и в распределение касательного напряжения по стенке и приводит к изменению местных и суммарных топологических структур. При различных сочетаниях положений и интенсивностей отсоса структура ПОВ при топологическом переходе может изменяться различным образом.

Сравнение эффектов отсоса в трех различных положениях (варианты 1, 2 и 3) показывает, что отсос вблизи наиболее удаленной особой точки (вариант 1) переводит полуседло отрыва  $S'$  в полузел присоединения  $N'$  при самом малом значении интенсивности отсоса. В варианте 2 малые интенсивности отсоса преобразуют стационарную систему ПОВ в нестационарную. В варианте 3 топологические изменения в системе ПОВ происходят медленно и при малых интенсивностях отсоса наиболее удаленной вверх по потоку особой точкой на поверхности продолжает быть  $S'$ .

При больших интенсивностях отсоса в вариантах 1 и 2 система ПОВ расщепляется на две системы, одна из которых находится выше по потоку от отверстия отсоса (внешняя зона отрыва), а вторая находится между отверстием отсоса и препятствием (внутренняя зона отрыва). В обоих случаях наиболее удаленной вверх по потоку особой точкой во внешней зоне отрыва является седло присоединения. Во внутренней зоне отрыва это седло отрыва для варианта 1 и седло присоединения для варианта 2.

Применение отсоса также меняет распределение касательного напряжения по стенке; в соответствии с этим выполнена дальнейшая проверка критерия, предложенного в работе [14]. На основе полученных численно-линейных поверхностного трения получены данные о местном касательном напряжении  $\tau_w$  на стенке и ширине трубки тока  $l$  в окрестности каждого седла на стенке; далее при их помощи получены значения дискриминантного коэффициента  $C_{S/A}$ , требуемые для вычисления критерия, предложенного в [14]. Во всех случаях картина течения, предсказанная на основании дискриминантного коэффициента  $C_{S/A}$ , совпадает с картиной отрыва или присоединения предельных линий тока вблизи седла. Этот метод может быть применен для предсказания отрыва или присоединения на всей поверхности пластины, за исключением особых точек, в которых не выполнены условия, диктуемые уравнением (2.1).

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (гранты 11372027 и 10872022). Работа также поддержана Фондом естественных наук провинции Хебей (грант E2019210026).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simpson R.L.* Junction flows // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2001. V. 33. P. 415.
2. *Zhang H., Hu B., Younis M.Y., Wang H.* // Investigation on existence and evolution of attachment saddle point structure of 3-D separation in juncture flow / *Proc. 2012 9th Intern. Bhurban Conf. on Applied Sciences & Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan.* 2012, p. 247.
3. *Chapman G.T.* Topological classification of flow separation on three-dimensional bodies // *AIAA Paper No. 485, 1986.*
4. *Hunt J.C.R., Abell C.J., Peterka J.A., Woo H.* Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization // *J. Fluid Mech.* 1978. V. 86. P. 179.
5. *Foss J.F.* Surface selections and topological constraint evaluations for flow field analyses // *Exp. Fluids.* 2004. V. 37. P. 883.
6. *Zhang H.X.* Structural analysis of separated flows and vortex motion. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
7. *Wu J.Z., Ma H.Y., Zhou M.D.* Vorticity and vortex dynamics. New York: Springer, 2005.
8. *Surana A., Grunberg O., Haller G.* // Exact theory of three-dimensional flow separation. Part 1. Steady separation. *J. Fluid Mech.* 2006. V. 564. P. 57.
9. *Surana A., Jacobs G.B., Grunberg O., Haller G.* An exact theory of three-dimensional fixed separation in unsteady flows // *Phys. Fluids.* 2008. V. 20. P. 107101.
10. *Surana A., Jacobs G.B., Haller G.* Extraction of separation and attachment surfaces from three-dimensional steady shear flows // *AIAA J.* 2007. V. 45. P. 1290.
11. *Perry A.E., Fairlie B.D.* Critical points in flow patterns // *Adv. Geophys.* 1974. V. 18(b). P. 299.
12. *Lighthill M. J.* Boundary layer theory. Oxford: Clarendon, 2005.
13. *Tobak M., Peake D.J.* Topology of two-dimensional and three-dimensional separated flows // *AIAA Paper No. 1480, 1979.*
14. *Hu B., Zhang H., Younis M.Y.* Saddle point of separation/attachment and topology transition in laminar juncture flows // *J. Visual.* 2019. V. 22. P. 713.
15. *Visbal M.R.* Structure of laminar juncture flows // *AIAA J.* 1991. V. 29. P. 1273.
16. *Hung C.M., Sung C.H., Chen C.L.* Computation of saddle point of attachment // *AIAA J.* 1992. V. 30. P. 1561.
17. *Chen C.L., Hung C.M.* Numerical study of juncture flows // *AIAA J.* 1992. V. 30. P. 1800.
18. *Rizzetta D.P.* Numerical simulation of turbulent cylinder juncture flow fields // *AIAA J.* 1994. V. 32. P. 1113.
19. *Zhang C.X., Shi J. X., Ke Zh. Q., Chen Ch. L.* Saddle point of attachment in jet-crossflow interaction // *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 2017. V. 31. P. 391.
20. *Coon M.D., Tobak M.* Experimental study of saddle point of attachment in laminar juncture flow // *AIAA J.* 1995. V. 33. P. 2288.
21. *Zhang H., Younis M.Y., Hu B., Wang H., Wang X.* Investigation of attachment saddle point structure of 3-D steady separation in laminar juncture flow using PIV // *J. Visual.* 2012. V. 15. P. 241.

22. *Younis M.Y., Zhang H., Hu B., Muhammad Z., Mehmood S.* Investigation of different aspects of laminar horse-shoe vortex system using PIV // *J. Mech. Sci. Technol.* 2014. V. 28. P. 527.
23. *Younis M.Y., Zhang H., Hu B., Mehmood S.* Topological evolution of laminar juncture flows under different critical parameters // *Sci. China Tech. Sci.* 2014. V. 57. P. 1342.
24. *Hu B., Zhang H., Younis M.Y., Li Y., Raza M.S.* Experimental investigation on the transition of separation/attachment in steady laminar juncture flows // *Exp. Fluids.* 2015. V. 56. P. 74.
25. *Himeno R., Kuwahara K., Kawamura T.* Computational study of circulation control with suction // *AIAA Paper No. 42*, 1985.
26. *Seal C.V., Smith C.R.* The control of turbulent end-wall boundary layers using surface suction // *Exp. Fluids.* 1999. V. 27. P. 484.
27. *Merchant A.A.* Design and analysis of axial aspirated compressor stages. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
28. *Kerrebrock J.L.* The prospects for aspirated compressors // *AIAA Paper No. 2472*, 2000.
29. *Kerrebrock J.L., Epstein A.H., Merchant A.A., Guenette G.R., Parker D., Onnee O.F.* Design and test of an aspirated counter-rotating fan // *J. Turbomach.* 2008. V. 130. P. 293.
30. *Li Y.H., Tang J., Liu H.* Numerical investigation of improving profile performances by steady suction air // *J. Eng. Thermophys.* 2005. V. 26. P. 572.
31. *Zhu Z.Q., Wu Z.C., Ding J.C.* Laminar flow control technology and application // *Acta. Aeronaut. Astronaut. Sinica.* 2011. V. 32. P. 765.

*Перевод М.Г. Лебедева*

## Suction controlled topological transition in laminar juncture flow

**B. Hu<sup>a,b,#</sup>, H. Zhang<sup>c,##</sup>, and M. Y. Younis<sup>d,###</sup>**

<sup>a</sup> *Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University (STDU),  
Shijiazhuang 050043, Hebei, P.R. China*

<sup>b</sup> *Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province,  
Shijiazhuang 050043, Hebei, P.R. China*

<sup>c</sup> *Ministry-of-Education Key Laboratory of Fluid Mechanics, School of Aeronautical Science and Engineering,  
Beihang University (BUAA), Beijing, 100191, P.R. China*

<sup>d</sup> *Department of Mechanical Engineering, Mirpur University of Science and Technology (MUST),  
Mirpur 10250 (AJK), Pakistan*

<sup>#</sup>*E-mail: hubohubo666@163.com*

<sup>##</sup>*E-mail: ltszh@buaa.edu.cn*

<sup>###</sup>*E-mail: myyounis.me@must.edu.pk*

The effects of suction on topological transition in juncture flow are studied experimentally and numerically. A number of combinations of the position where suction is applied, and the flow rates are investigated and their effects on topological transition of laminar juncture flow are assessed. It is observed that for any particular case, a combination of suction holes position and volume flow rate can transform the most upstream surface singular point of the horseshoe vortex (HSV) system from saddle of separation to saddle of attachment. Topological transition at low suction rates is achieved when suction holes are placed close to the separation region. Better HSV control is achieved when suction is applied close to the juncture at high suction rates. A previously proposed separation/attachment prediction method based on mass conservation is also consolidated by analyzing the simulated results of suction controlled and originally generated wall saddles. The results suggest that the topological transition (separation/attachment) at each wall saddle could be accurately estimated according to the sign of a discriminant coefficient  $C_{S/A}$  comprised of the local shear stress ( $\tau_w$ ) on the wall and stream-tube width ( $n$ ) near the saddle.