

УДК 533.6.011.5

## **Экспериментальное исследование влияния выдува на изменение аэродинамических характеристик обтекаемого сжимаемым потоком цилиндрического тела конечного размера\***

**В.А. Кисловский, Н.А. Рябченко, Д.А. Семченко**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: kislovsky\_v@mail.ru

В работе изложены результаты экспериментального измерения аэродинамических сил, действующих на цилиндрическое тело конечного размера, обтекаемое сжимаемым потоком. Исследовано поперечное обтекание цилиндра и влияние изменения угла рысканья в диапазоне  $\beta = 0 - 9^\circ$ . Для каждого положения цилиндра изучено несколько случаев расположения отверстия выдува по радиусу обтекаемого цилиндра. Измерение сил проводилось с использованием тензометрических датчиков. Рассмотрено изменение силы лобового сопротивления, подъемной силы, момента рысканья и момента крена.

По результатам выполненной работы получены новые экспериментальные данные о влиянии выдува на изменение аэродинамических характеристик обтекаемого сжимаемым потоком цилиндрического тела конечного размера. Проведен анализ полученных данных и их интерпретация.

**Ключевые слова:** выдув газовой струи, сжимаемые течения, аэродинамические силы, эксперимент.

### **Введение**

В настоящее время быстро развиваются и нашли широкое применение различные методы математического моделирования. Это, безусловно, касается и численного решения задач газодинамики. Одной из целей использования экспериментальной газовой динамики является получение новых экспериментальных данных, направленных на развитие и верификацию методик численного моделирования.

Исследование поперечного обтекания тела цилиндрической формы является хорошо изученной классической задачей газовой динамики [1, 2]. В современной постановке эта классическая задача усложняется дополнительными факторами. Так, например, часто рассматривается поперечное обтекание для вращающегося цилиндра [3], колеблющегося цилиндра [4], цилиндра с прорезьями [5], цилиндра с отсосом пограничного слоя [6] и др. Однако все указанные выше работы описывают случаи поперечного обтекания цилиндра несжимаемым потоком. Аналогичных исследований поперечного обтекания

---

\* Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного РФ (№ 23-79-01057).

цилиндра сжимаемым потоком с факторами, влияющими на обтекание этого цилиндра, крайне мало. Способов влияния на аэродинамические характеристики обтекаемого сжимаемым потоком тела бесконечное множество. Одним из широко распространенных и хорошо изученных способов является выдув одиночной круглой струи [7–9]. Обзор исследований, рассматривающих выдув газовой струи в целях изменения аэродинамических характеристик осесимметричного тела в сжимаемом потоке, приведен в том числе в работе [10]. При этом следует подчеркнуть, что экспериментально широко исследовано влияние выдува газовой струи на аэродинамические характеристики осесимметричных тел в сжимаемом потоке при углах атаки в диапазоне  $\alpha = 0 - 20^\circ$  [11, 12]. Экспериментальных данных, полученных при физическом моделировании поперечно обтекаемого цилиндра сжимаемым потоком при выдуве газовой струи с поверхности этого цилиндра, крайне мало.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию изменения аэродинамических сил, действующих на поперечно обтекаемый сжимаемым потоком цилиндр, при относительно небольшом изменении угла рыскания и различных вариантах расположения отверстия выдува по радиусу рассматриваемого цилиндра.

### Постановка задачи

Исследуется обтекание модели цилиндрической формы диаметром  $d = 25$  мм и длиной  $l = 80$  мм. Модель обтекается сжимаемым потоком (с числом Маха  $M = 3$ ) со скоростью  $V = 616$  м/с при значениях полного давления и полной температуры  $P_0 = 2$  Мпа и  $T_0 = 298$  К соответственно.

Обтекание цилиндра рассматривается как без выдува газовой струи с поверхности этого цилиндра, так и при нескольких вариантах выдува. Варианты выдува струи отличались положением отверстия выдува по окружности обтекаемого цилиндра, как показано на рис. 1. В первом варианте выдува отверстие располагалось на омываемой части боковой поверхности цилиндра таким образом, что ось отверстия выдува совпадала с вектором набегающего потока ( $\chi = 0^\circ$ ), при этом направление истечения струи было противоположно направлению набегающего потока. Во втором варианте выдува отверстие выдува размещалось на омываемой части боковой поверхности цилиндра таким образом, что ось отверстия выдува была отклонена на  $\chi = 45^\circ$  от направления вектора набегающего потока. В третьем варианте выдува ось отверстия выдува была направлена перпендикулярно направлению вектора набегающего потока ( $\chi = 90^\circ$ ). В четвертом варианте выдува отверстие выдува располагалось на неомываемой части боковой поверхности цилиндра таким образом, что ось отверстия выдува была отклонена на  $\chi = 135^\circ$  от направления вектора набегающего потока. В пятом варианте выдува отверстие размещалось на неомываемой части боковой поверхности цилиндра таким образом, что ось отверстия выдува совпадала с вектором набегающего потока ( $\chi = 180^\circ$ ), при этом направление истечения струи было сонаправленным с набегающим потоком. Во всех случаях отверстие выдува диаметром  $d_j = 2$  мм располагалось посередине длины модели. Параметры

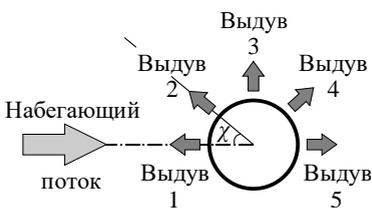


Рис. 1. Схема вариантов выдува струи.

Варианты выдува 1–5 соответственно при  $\chi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ .

выдува — величины полного давления  $P_{0j} = 2,4$  МПа и полной температуры  $T_{0j} = 298$  К — во всех случаях были неизменны.

Помимо поперечного обтекания цилиндра рассматривается также обтекание при небольших углах рыскания в диапазоне  $\beta = 0 - 9^\circ$ .

### Методика эксперимента

Исследование проводилось в импульсной аэродинамической трубе. Продолжительность рабочего режима аэродинамической трубы в эксперименте составляла  $t = 0,7$  с. Диаметр среза сопла  $D = 100$  мм. Схема размещения модели в рабочей части аэродинамической трубы приведена на рис. 2.

Воздух на выдув подавался из баллона со сжатым воздухом через редуктор. Редуктор, заранее отрегулированный на давление  $P_{0j}$ , обеспечивал в эксперименте постоянное полное давление выдува струи вне зависимости от изменения давления в баллоне. Воздух в модель поступал после открытия клапана. Работа системы автоматизации эксперимента была настроена таким образом, что сначала открывался клапан подачи воздуха для выдува струи. После выхода струи на режим установившегося истечения производился запуск аэродинамической трубы. Это позволило получить квазистационарную картину обтекания на всей продолжительности рабочего режима эксперимента.

Также в работе рассматривался вариант выдува струи с поверхности модели в установившееся течение набегающего потока. Однако скорость нестационарных явлений, связанных с процессом установления истечения струи, в этом случае была намного выше скорости записи данных. Результат не показал отличия от обтекания модели с установившимся режимом истечения струи. Для записи данных использовалась система L-CARD с частотой регистрации сигнала 10 кГц.

Подача воздуха непосредственно в полую модель осуществлялась через стальную трубку с внутренним диаметром 4 мм. Эта трубка являлась также осью для закрепления модели на тензодатчике. На другом торце модели симметрично также была закреплена

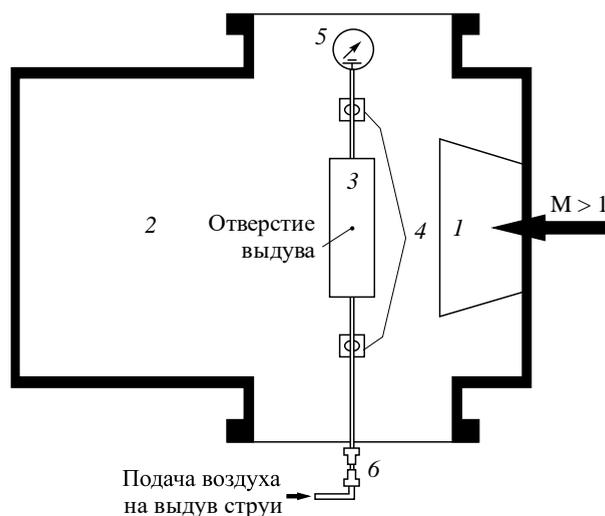


Рис. 2. Схема размещения модели в рабочей части аэродинамической трубы.

1 — сопло, 2 — рабочая часть аэродинамической трубы,  
3 — модель, 4 — тензодатчики, 5 — датчик давления,  
6 — клапан.

аналогичная трубка, прикрепленная к такому же тензодатчику. К выходу этой трубки был подключен датчик давления, который позволял фиксировать изменения полного давления выдуваемой струи в эксперименте.

Для изменения угла рыскания стойки с тензодатчиками, к которым крепилась модель, перемещались вперед (по направлению к соплу аэродинамической установки) и назад (от сопла аэродинамической установки). Это позволяло менять угол рыскания модели ( $\beta = 0 - 9^\circ$ ), осуществляя поворот вокруг ее центра.

Так как модель фиксировалась через оси на два тензодатчика, расположенные по обеим сторонам от модели, то сумма показаний датчиков определяла осевые аэродинамические усилия в соответствующих расположению датчиков направлениях, а разность показаний датчиков позволяла определять аэродинамические моменты. Таким образом, проводились измерения силы лобового сопротивления, подъемной силы и моментов сил. Среднее квадратичное отклонение проводимых измерений составляло  $\sigma(C_x) = \pm 0,0001$ ,  $\sigma(C_y) = \pm 0,00007$ ,  $\sigma(m_y) = \pm 0,0002$ ,  $\sigma(m_x) = \pm 0,00018$ .

## Результаты

### Изменение силы лобового сопротивления

При поперечном обтекании цилиндра без выдува струи коэффициент лобового сопротивления этого цилиндра составлял  $C_{x_0} = 0,446$ . При различных вариантах выдува происходили разные изменения лобового сопротивления  $\Delta C_x = C_{x_j} - C_{x_0}$ , (здесь  $C_{x_j}$  — коэффициент лобового сопротивления модели). Это изменение лобового сопротивления показано на рис. 3.

При первом варианте выдува — против направления набегающего потока — наблюдалось снижение лобового сопротивления на 5 %, что являлось ожидаемым результатом, так как выдув струи против набегающего потока — это известный способ снижения лобового сопротивления, описанный во множестве работ [6–8]. Второй вариант выдува струи привел к незначительному увеличению лобового сопротивления — на 0,2 %. Третий вариант выдува, который соответствует перпендикулярному направлению выдува струи относительно набегающего потока, не привел к изменению силы лобового сопротивления. Четвертый и пятый варианты выдува струи показали снижение

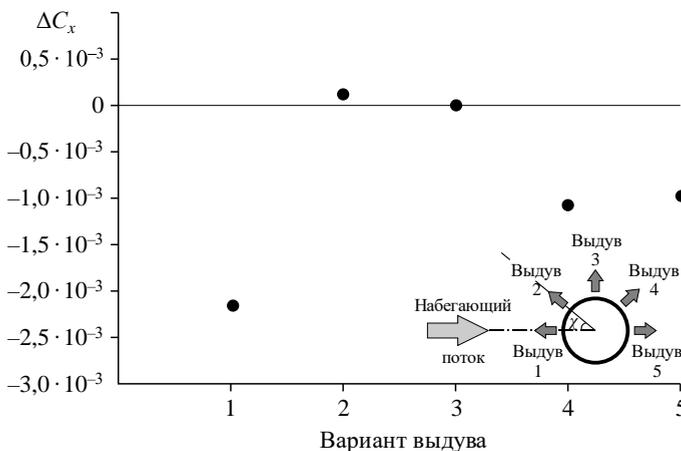


Рис. 3. Влияние варианта выдува на изменение силы лобового сопротивления.

лобового сопротивления примерно на 2,5 %. Это в половину меньше, чем при первом варианте выдува струи.

Изменение лобового сопротивления  $\Delta C_x$  также можно разложить на две составляющие. К первой относится действие реактивной тяги выдуваемой струи  $C_{x_R}$ , ко второй — результат действия сил давления  $C_{x_K}$ , возникающих вследствие перераспределения давления на поверхности обтекаемого тела при взаимодействии сжимаемого потока со струей. Эту силу давления в литературе обычно представляют в виде коэффициента силы давления, нормированного на реактивную тягу струи, и называют коэффициентом усиления струи  $K$  [9].

На рис. 4 представлены составляющие изменения силы лобового сопротивления  $C_{x_R}$  и  $C_{x_K}$  для всех рассмотренных случаев выдува. Анализ компонентов, совокупность которых приводит к изменению сил лобового сопротивления, позволил полнее понять исследуемые процессы. Так, в первом варианте направление выдува было строго противоположно направлению набегающего потока, соответственно, вектор реактивной тяги струи полностью оказывал воздействие в направлении действия силы лобового сопротивления, усиливая ее. Однако общая сила лобового сопротивления для данного рассмотренного случая значительно уменьшилась. Это связано с изменившимся полем давления на поверхности обтекаемого цилиндра. Струя создала значительную зону разрежения вблизи отверстия выдува, что привело к общему уменьшению силы лобового сопротивления.

Во втором варианте воздействие реактивной тяги выдуваемой струи в направлении действия силы лобового сопротивления уменьшилось в соответствии с косинусоидальной зависимостью этого воздействия от угла наклона выдува струи относительно направления действия силы лобового сопротивления. При сравнении с первым вариантом выдува видно, что величина воздействия реактивной тяги струи уменьшилась в 1,28 раза, что можно считать незначительным изменением по сравнению с уменьшением силы воздействия от перераспределения давления в 7,88 раз. В рассматриваемом случае

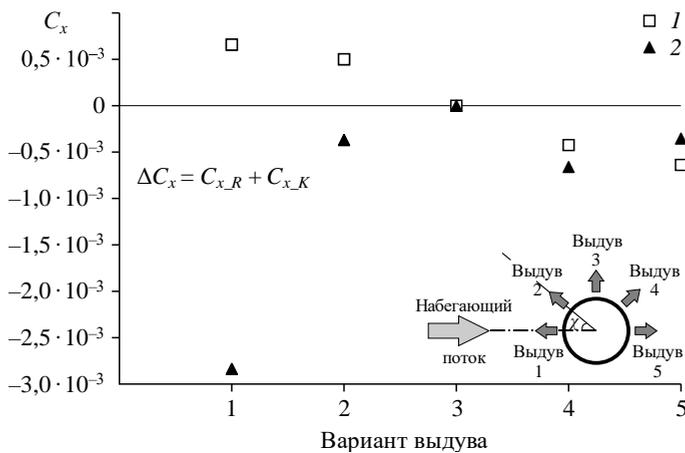


Рис. 4. Составляющие изменения силы лобового сопротивления для всех рассмотренных случаев выдува струи.

Составляющие изменения лобового сопротивления от действия реактивной тяги струи  $C_{x_R}$  (1) и от перераспределения давления  $C_{x_K}$  (2).

эти изменения, как видно из рис. 1, привели к небольшому увеличению силы лобового сопротивления. При этом остается неочевидной степень изменения коэффициента лобового сопротивления, связанного с действием силы давления  $C_{x_K}$ , на промежутке между положениями отверстия выдува в первом и во втором вариантах выдува.

В третьем случае выдува струи вследствие перпендикулярного направления действия силы давления и тяги струи относительно направления действия силы лобового сопротивления изменения силы лобового сопротивления не происходило. Следует отметить, что при изменении положения отверстия выдува от второго варианта выдува к третьему имело место линейное или близкое к линейному уменьшение влияния всех эффектов выдува на силу лобового сопротивления.

В четвертом и пятом случаях оба выдува струи были направлены в сторону противодействия силе лобового сопротивления. Таким образом, суммарное воздействие  $C_{x_R}$  и  $C_{x_K}$  привело к уменьшению силы лобового сопротивления в указанных случаях выдува. Полученный результат для четвертого и пятого вариантов выдува свидетельствует, что в этих случаях рядом с отверстием выдува струи образуется завихренное течение с большим градиентом скорости вблизи поверхности обтекания. Оно аналогично тому, которое формируется при сверхзвуковом поперечном взаимодействии набегающего потока и струи [7–12]. В области этой завихренности на поверхности цилиндра формируется зона повышенного статического давления. Также видно, что указанная зона в пятом случае выдува уменьшается по площади (или величине давления) по сравнению с четвертым случаем. При этом степень изменения коэффициента лобового сопротивления, связанного с действием силы давления  $C_{x_K}$ , на промежутке между положениями отверстия выдува в третьем и четвертом вариантах выдува не очевидна.

### ***Изменение подъемной силы***

Изменение подъемной силы для всех вариантов выдува изучалось аналогично изменению силы лобового сопротивления. Результаты показаны на рис. 5 и 6.

Так, в первом варианте выдува струи, направленного против набегающего потока, показано отсутствие влияния выдува на изменение подъемной силы. Это связано с перпендикулярным направлением векторов силы давления и реактивной тяги струи относительно направления действия подъемной силы. На рис. 5 заметно незначительное увеличение подъемной силы для данного варианта выдува струи, однако указанная величина лежит в рамках погрешности. Сразу отметим, что в пятом варианте выдува, также как и в первом, отсутствовало изменение подъемной силы.

Во втором варианте выдува струи воздействие на изменение подъемной силы осуществлялось только за счет действия реактивной тяги струи, что хорошо видно на рис. 6. Коэффициент усилия этого воздействия составил  $C_{y_R} = 0,0004$ .

Поперечный набегающему потоку выдув струи в третьем варианте показал наибольшее значение изменения подъемной силы. Это связано с суммарным сонаправленным воздействием силы давления и реактивной тяги струи. В этом случае усилие воздействия от тяги струи имело полную величину, так как направление этого вектора полностью совпадало с направлением действия подъемной силы. Также становится очевидным появление области завихренности с большим градиентом скорости около отверстия выдува и, как следствие, возникновение зоны повышенного статического давления около отверстия

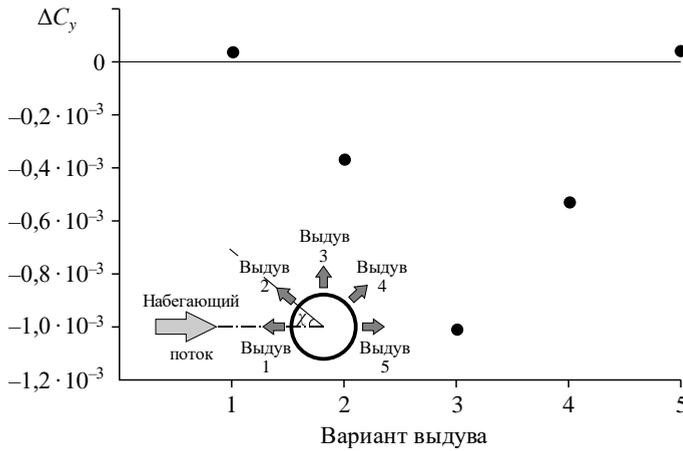


Рис. 5. Влияние варианта выдува на изменение подъемной силы.

выдува на участке от второго варианта выдува к третьему. Эта область завихренности схожа с другой такой же областью, присутствующей в классическом случае сверхзвукового поперечного взаимодействия набегающего потока и струи [7–12]. Присутствие области завихренности в рассматриваемом течении приводит к узнаваемому изменению аэродинамических характеристик. Если сравнивать третий и второй варианты выдува струи, то можно отметить увеличение общей величины подъемной силы в 2,5 раза в третьем варианте выдува струи. Однако прирост, вызванный изменением угла наклона вектора реактивной тяги струи относительно направления действия подъемной силы, составил 50 % от общего изменения, в то время как появление силы давления привело к увеличению подъемной силы на 100 %.

В четвертом варианте выдува струи по сравнению с третьим вариантом изменение подъемной силы уменьшилось. При этом уменьшились обе составляющие воздействия —  $C_{x_R}$  и  $C_{x_K}$ . Очевидно, что в четвертом варианте выдува струи изменился угол наклона вектора реактивной тяги струи по сравнению с третьим вариантом, что привело к уменьшению

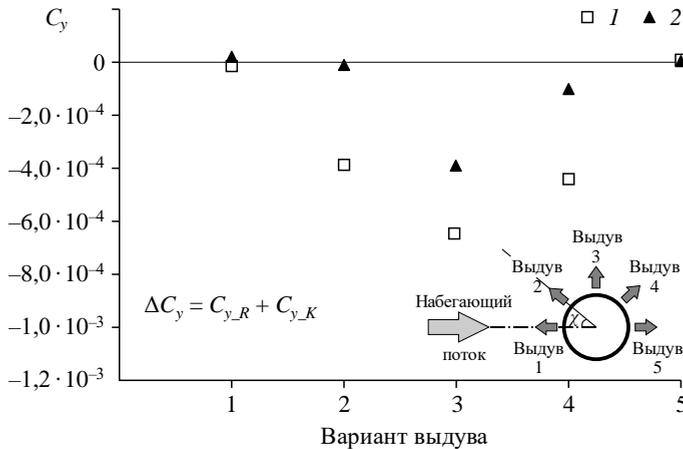


Рис. 6. Составляющие изменения подъемной силы для всех рассмотренных случаев выдува струи.

Обозначения см. на рис. 4.

величины воздействия на изменение подъемной силы. Относительно силы давления в этом случае не до конца ясно, что повлияло на уменьшение величины воздействия, на изменение подъемной силы. Возможно как совокупное, так и частное влияние изменения угла наклона вектора интегральной силы давления, уменьшения площади зоны повышенного давления и/или уменьшения величины статического давления в этой зоне. При сравнении второго и четвертого варианта выдува струи становится видно, что при равных усилиях от реактивной тяги струи изменение подъемной силы в четвертом варианте выдува на 25 % больше за счет присутствия силы давления.

### Влияние изменения угла рыскания

Изучение влияния угла рыскания в диапазоне  $\beta = 0-9^\circ$  показало, что увеличение угла рыскания приводит к уменьшению общей величины силы лобового сопротивления (см. рис. 7). Изменение угла рыскания не показывает качественного изменения зависимости лобового сопротивления по сравнению с другими рассматриваемыми случаями выдува. Однако можно отметить, что во втором и четвертом вариантах выдува величины коэффициента силы лобового сопротивления для углов рыскания  $\beta = 0^\circ$  и  $\beta = 3^\circ$  практически совпадали, в отличие от остальных вариантов выдува. Также видно, что в пятом варианте выдува при  $\beta = 0^\circ$  сила лобового сопротивления незначительно увеличилась по сравнению с четвертым вариантом выдува. Одновременно увеличение угла рыскания приводило к относительному уменьшению силы лобового сопротивления при сравнении этих двух вариантов выдува. Конкретные объяснения указанных особенностей могут быть сформулированы после проведения исследования распределения давления.

Изменение угла рыскания ожидаемо не привело к изменению суммарной величины подъемной силы, что можно видеть на рис. 8.

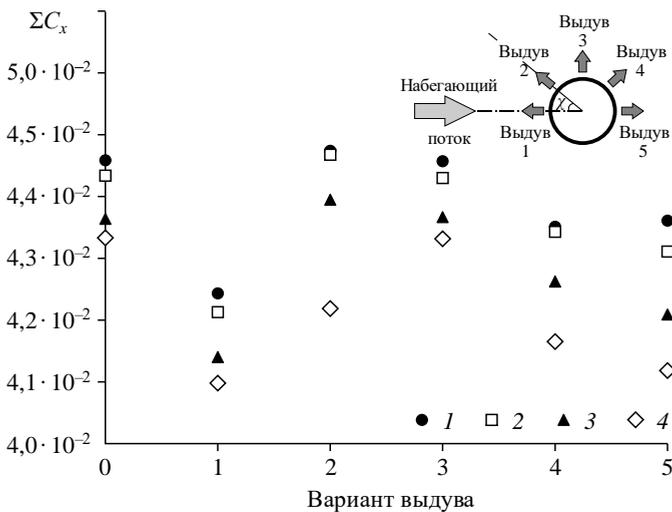


Рис. 7. Полный коэффициент силы лобового сопротивления  $\Sigma C_x$  для всех случаев выдува при значениях угла рыскания  $\beta = 0^\circ$  (1),  $3^\circ$  (2),  $6^\circ$  (3),  $9^\circ$  (4).

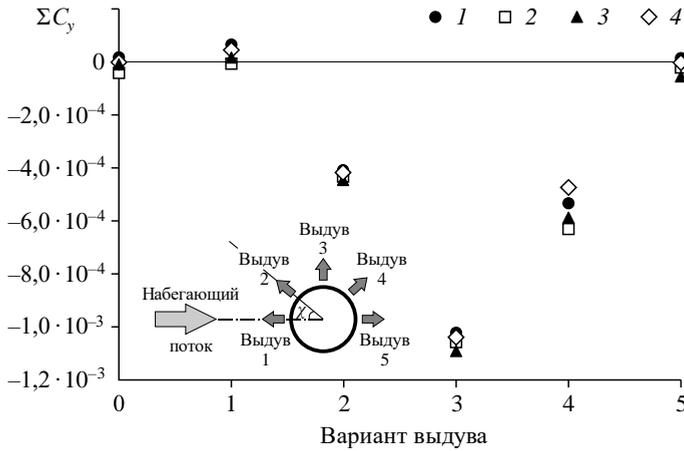


Рис. 8. Полный коэффициент подъемной силы  $\Sigma C_y$  для всех случаев выдува при значениях угла рыскания  $\beta = 0^\circ$  (1),  $3^\circ$  (2),  $6^\circ$  (3),  $9^\circ$  (4).

На рис. 9 приведены значения коэффициента момента рыскания  $\Sigma m_y$  для всех случаев выдува при различных углах рыскания в диапазоне  $\beta = 0-9^\circ$ . Появление угла рыскания, отличного от  $0^\circ$ , привело к несимметричности обтекания и возникновению момента  $\Sigma m_y$ . Вследствие увеличения угла рыскания увеличился и этот момент как для случая без выдува струи, так и для всех случаев выдува струи. Первый и второй варианты выдува струи приводили с разной степенью к увеличению момента рыскания, а четвертый и пятый варианты выдува привели, наоборот, к уменьшению момента рыскания. Это связано с несимметричным перераспределением давления относительно плоскости симметрии. Третий вариант выдува струи не повлиял на изменение момента рыскания.

На рис. 10 представлены значения коэффициента момента крена  $\Sigma m_x$  для всех случаев выдува при различных углах рыскания, применяемых в диапазоне  $\beta = 0-9^\circ$ .

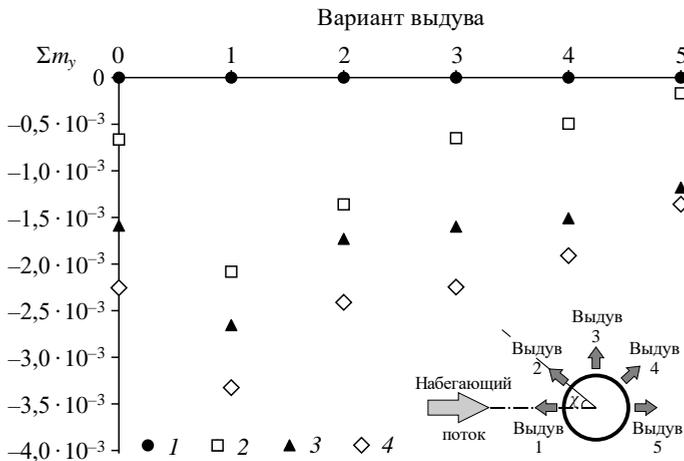


Рис. 9. Полный коэффициент момента рыскания  $\Sigma m_y$  для всех случаев выдува при значениях угла рыскания  $\beta = 0^\circ$  (1),  $3^\circ$  (2),  $6^\circ$  (3),  $9^\circ$  (4).

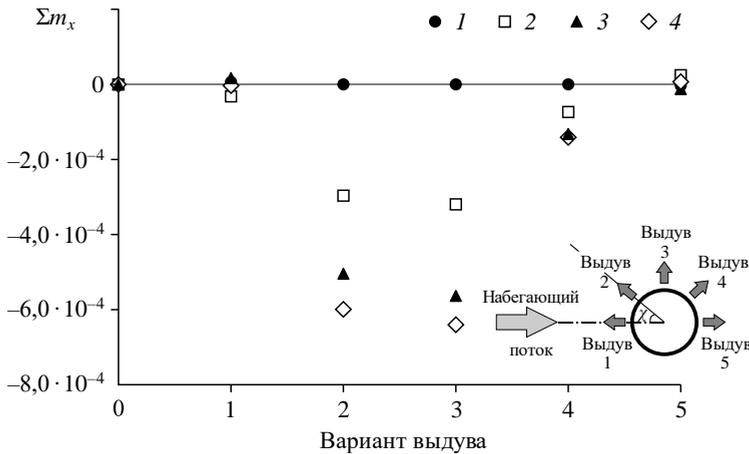


Рис. 10. Полный коэффициент момента крена  $\Sigma m_x$  для всех случаев выдува при значениях угла рыскания  $\beta = 0^\circ$  (1),  $3^\circ$  (2),  $6^\circ$  (3),  $9^\circ$  (4).

Появление угла рыскания, отличного от  $0^\circ$ , привело к несимметричности распределения зон давления относительно плоскости симметрии для второго, третьего и четвертого вариантов выдува, вследствие чего появился момент  $\Sigma m_x$ . При этом максимальное значение момента крена было в 4,86 раз слабее момента рыскания.

### Выводы

Проведено экспериментальное измерение аэродинамических сил, действующих на цилиндрическое тело конечного размера, обтекаемое сжимаемым потоком, при выдуве газовой струи с его поверхности. Исследовано поперечное обтекание цилиндра при различных вариантах положения отверстия выдува по окружности этого цилиндра и влияние изменения угла рыскания в диапазоне  $\beta = 0 - 9^\circ$ . Получены следующие результаты.

1. Обнаружено уменьшение лобового сопротивления на 5 % при выдуве струи против набегающего потока (первый вариант выдува) и отсутствие изменения лобового сопротивления при выдуве струи перпендикулярно направлению набегающего потока (третий вариант выдува). Выдув по потоку и выдув под углом к потоку (пятый и четвертый варианты выдува) также снизили лобовое сопротивление, но вполтину меньше, чем в случае первого варианта выдува. При втором варианте выдува имело место незначительное увеличение силы лобового сопротивления. Не до конца ясны особенности изменения составляющей коэффициента лобового сопротивления, связанной с перераспределением давления на промежутках между положениями отверстия в первом и втором вариантах выдува, а также между третьим и четвертым.

2. Выдув струи против набегающего потока или по потоку не приводит к изменению подъемной силы (первый и пятый варианты выдува). Изменение положения отверстия выдува по третьему варианту, т.е. с поперечным выдувом струи относительно набегающего потока, привело к очевидному увеличению изменения подъемной силы. Указанное изменение связано с ростом действия реактивной тяги струи как вследствие уменьшения угла наклона вектора истечения струи относительно направления действия подъемной силы, так и вследствие усиления действия силы давления. При этом сила давления появилась на участках между положением отверстия выдува во втором и третьем

вариантах выдува, а также на участке между положением отверстия выдува в четвертом и пятом вариантах выдува. Однако факторы, влияющие на изменения силы давления, не до конца очевидны. Тем не менее третий вариант выдува струи ожидаемо показал наибольшее значение изменения подъемной сила.

3. Изменение угла рыскания от  $0^\circ$  до  $9^\circ$  привело к общему снижению лобового сопротивления примерно на 3 % для всех вариантов выдува струи, не повлияв на качественную зависимость лобового сопротивления от вариантов выдува струи.

4. Изменение угла рыскания не привело к изменению подъемной силы для всех вариантов выдува.

5. Показана несимметричность распределения давления при изменении угла рыскания и изменении моментов рыскания и крена в зависимости от варианта выдува струи.

### Список литературы

1. **Корнилов В.И., Лысенко В.И.** Вследствие аэродинамических характеристик цилиндрических тел в сверхзвуковом потоке газа // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2011. Т. 6, № 4. С. 16–24.
2. **Башкин В.А., Егоров И.В., Езов И.В., Утюжников С.В.** Поперечное обтекание кругового цилиндра трансзвуковым ( $m_\infty = 0,8$ ) потоком при больших числах Рейнольдса // Учен. записки ЦАГИ. 2012. Т. 43, № 5. С. 27–45.
3. **Танашева Н.К., Нусупбеков Б.Р., Дюсембаева А.Н., Шуяшбаева Н.Н.** Исследование аэродинамических характеристик вращающихся цилиндров, расположенных параллельно друг другу // Журн. техн. физики. 2019. Т. 89, № 7. С. 1006–1008.
4. **Suthon P., Dalton C.** Streakline visualization of the structures in the near wake of a circular cylinder in sinusoidally oscillating flow // J. Fluids and Structures. 2011. Vol. 27, No. 7. P. 885–902.
5. **Gao D., Chen W., Li H., Hu H.** Flow around a slotted circular cylinder at various angles of attack // Exp. Fluids. 2017. Vol. 58, No. 10. P. 132–148.
6. **Chen W., Li H., Hu H.** An experimental study on a suction flow control method to reduce the unsteadiness of the wind loads acting on a circular cylinder // Exp. Fluids. 2014. Vol. 55, No. 10. P. 1707–1720.
7. **Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С.** Численное моделирование взаимодействия поперечной струи со сверхзвуковым потоком с использованием различных моделей турбулентности // Прикл. механика и технич. физика. 2015. Т. 56, № 5. С. 64–76.
8. **Zucker R.D., Biblarz O.** Fundamentals of gas dynamics. Hoboken, N.Y.: Wiley, 2002. 512 p.
9. **Краснов Н.Ф., Калугин В.И., Кошевой В.Н., Краснова Н.Ф.** Аэродинамика отрывных течений. М.: Высшая школа, 1988. 351 с.
10. **Кисловский В.А.** Изменение сил на поверхности осесимметричного тела конечного размера в сверхзвуковом потоке при выдуве поперечной газовой струи: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2021. 111 с.
11. **Brandeis J., Gill J.** Experimental investigation of super- and hypersonic jet interaction on missile configurations // J. Spacecraft and Rockets. 1998. Vol. 35, No. 3. P. 296–302.
12. **Tian S., Peng Z.** Mesh Adaptation for simulating lateral jet interaction flow // Aerospace. 2022. Vol. 9, No. 12. P. 781–800.

*Статья поступила в редакцию 10 июня 2024 г.,  
после доработки — 13 сентября 2024 г.,  
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*