

УДК 532.525.2:533.6.011.8

ВСТРЕЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ НЕДОРАСШИРЕННЫХ РАЗРЕЖЕННЫХ СООСНЫХ СТРУЙ

Е.И. СОКОЛОВ, И.В. ШАТАЛОВ

*Балтийский государственный технический университет,
Санкт-Петербург*

В результате экспериментального исследования встречного взаимодействия двух соосных недорасширенных разреженных струй обнаружена перестройка волновой структуры от осесимметричной к кососимметричной с уменьшением числа Рейнольдса при фиксированных числах Маха на выходе сопел, нерасчетностях струй и расстоянии между соплами. Исследована зависимость кососимметричной структуры от основных параметров. По аналогии с режимами взаимодействия струи с преградой предлагается общая классификация режимов течения; особо выделены режимы автоколебаний.

1. К настоящему времени течение во встречных соосных недорасширенных струях изучено значительно меньше, чем во многом схожее с ним течение при взаимодействии струи с плоской преградой, перпендикулярной ее оси [1 – 3]. Эксперименты [1, 3], в частности, показали, что изменение расстояния между соплами L или нерасчетности струй n может привести к нарушению устойчивости среднего положения поверхности раздела (ПР) и ее скачкообразному переходу в сторону одного из сопел. Для струй с числами Маха на срезе сопел $M_{a1} = M_{a2} = 1$ при увеличении L (уменьшении n) в [3] выделены три характерных режима течения: малым L соответствует продольно-симметричная структура, когда поверхность раздела является плоскостью симметрии; увеличение L приводит к скачкообразному смещению ПР в сторону одного из сопел; при дальнейшем увеличении L вновь восстанавливается продольная симметрия, но струи взаимодействуют друг с другом своими основными участками. Осевая симметрия во всех экспериментах [3] сохранялась, потеря продольной симметрии объяснялась с помощью анализа условий равновесия поверхности раздела. При уменьшении L чередование режимов происходит в обратной последовательности, но при иных параметрах течения, т. е. явление обладает гистерезисом, благодаря чему можно наблюдать совершенно различные волновые структуры во встречных струях при одинаковых параметрах течения. В работе [3] это свойство было названо неоднозначностью волновой структуры во встречных струях.

Исследования [1, 3] проводились в достаточно узком диапазоне параметров. Так, не изучалась зависимость течения от изменения характерного числа Рейнольдса струй, хотя известно [4], что вязкость оказывает заметное влияние на течение в струе, взаимодействующей с безграничной преградой. Влияние разреженности на процесс встречного взаимодействия исследовалось в [2], но только для встречных струй, имеющих разные давления торможения ($p_{01}/p_{02} = 2$).

Ниже приводятся результаты экспериментов, существенно расширяющие исследованный в [3] диапазон параметров. Это позволило уточнить оценки

областей существования уже известных типов течения и провести более широкое обобщение результатов. Кроме того, в дополнение к [3] выделены течения с автоколебаниями волновой структуры и кососимметричное течение с нарушением осевой симметрии.

Эксперименты проводились в вакуумной камере. Ресиверы с соплами устанавливались на общих направляющих. Это обеспечивало соосность сопел при перемещении одного из ресиверов с помощью координатного механизма. Чтобы избежать возможного влияния акустической обстановки на исследуемое течение, особенно на автоколебательных режимах [5], ресиверы были смонтированы так, чтобы соизмеримые с линейными размерами струи (~ 20 мм) поверхности (экраны) и стенки барокамеры находились на расстоянии не менее 500 мм от срезов сопел. Визуализация течения проводилась с помощью электронно-пучковой диагностики и тлеющим разрядом с последующей обработкой фотографий. Для наблюдения пространственных течений над общими направляющими сопел было установлено зеркало, параллельное оси струи и наклоненное под углом 45° к плоскости иллюминатора барокамеры. Это позволило наблюдать течения одновременно при виде как “спереди”, так и “сверху”. Использовалось также оборудование для измерения давления на базе датчиков ДМИ, градуированных по наклонному спиртовому манометру; точность измерений давления была не хуже 15 %. Датчик закреплялся непосредственно на преграде за дренажным отверстием диаметром 1 мм. Акустическое излучение струи внутри вакуумной камеры регистрировалось электродинамическим микрофоном МД-52Б с воспроизведением через динамик.

Все исследования проводились со струями воздуха в следующем диапазоне параметров: $T_0 = 293$ К, $M_{a1} = M_{a2} = 1,0; 2,12; 3,34$; $n = p_a/p_\infty = 15 - 90$; расстояние между соплами $l = 5 - 600$ мм; $d_a = 1,23 - 4$ мм; $Re_L = Re_*(p_0/p_\infty)^{-0,5} = 38 - 1350$; $L = l/Q = 0,5 - 20$. Символы 0, *, a, ∞ относятся соответственно к параметрам торможения, в критическом сечении, на выходе сопла и в окружающем пространстве; $Q = M_a d_a (\gamma n)^{0,5}$, γ — показатель адиабаты. Экспериментальное оборудование и методы измерений описаны в [4, 6].

2. Как уже было отмечено, рассматриваемое течение сходно с хорошо изученным нормальным взаимодействием струи с безграничной плоской преградой. При встречном взаимодействии струй с сохранением продольной симметрии течение в каждой из них, с точностью до влияния пограничного слоя, тождественно вышеназванному. Будем поэтому анализировать изменение картины течения во встречных струях, используя классификацию типов течения [7], образующихся перед безграничной плоской преградой, расположенной перпендикулярно оси недорасширенной струи на расстоянии h от среза (относительное расстояние $H = h/Q$). Согласно [7], при увеличении H последовательно реализуются следующие режимы течения: стационарный с радиальным растеканием, первый автоколебательный, режим с центральной циркуляционной зоной, второй автоколебательный и режим с невозмущенной первой бочкой. Границы их существования по H и Re_L достаточно точно установлены опытным путем [6, 7].

Полная физическая картина смены типов течения при взаимодействии встречных струй с $M_{a1} = M_{a2} = 1$ представлена на рис. 1 в виде карты, построенной на базе экспериментальных данных по аналогии с [6] в обобщенных координатах $Re_L - L/2$, где $L/2$ эквивалентно расстоянию H в [6, 7]. Границы областей существования режимов обозначены двойными штриховыми линиями, что качественно отражает отмеченный в [3] гистерезис в установлении режимов при увеличении или уменьшении $L/2$.

Проанализируем полученные результаты, рассматривая эволюцию течения с увеличением $L/2$ при фиксированном Re_L . Для наглядности на рис. 1

Рис. 1. Типы течения при встречном взаимодействии недорасширенных разреженных струй.

Поясн. см. в тексте.

представлены характерные для каждого режима ударно-волновые структуры, построенные по данным визуализации.

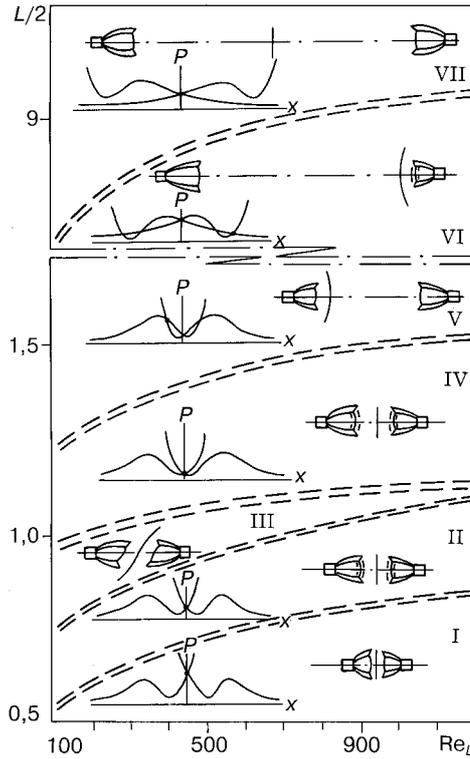
В струях большой плотности ($Re_L > 1000$) малым значениям $L/2$ соответствует структура с продольной симметрией, плоской ПР и радиальным растеканием газа от оси (режим I). Возрастание $L/2$ до значения 0,78 – 0,8 приводит к возникновению интенсивных симметричных относительно ПР автоколебаний волновой структуры обеих струй (режим II). Эти автоколебания отчетливо наблюдаются при визуализации течения и сопровождаются резким возрастанием воспроизводимого динамиком акустического излучения струи, что позволяет достаточно точно определить границы режимов II и IV, которые совпадают

с границами автоколебательных режимов при взаимодействии струи с перпендикулярной преградой [6, 7]. При $Re_L > 1000$ автоколебательный режим наблюдается практически во всем диапазоне $L/2 = 0,8 - 1,5$ за исключением узкой области, где спонтанно и нерегулярно может происходить срыв автоколебаний и формирование косимметричной волновой структуры во встречных струях (режим III). Подробнее об этой структуре будет сказано ниже при анализе влияния числа Re_L .

В работе [3] приведены результаты исследования течения в окрестности поверхности раздела струй для диапазона расстояний, соответствующего режиму с центральной циркуляционной зоной в струе перед преградой. Визуализация с помощью флюгерно-зондовой методики [4] показала, что общий ударный слой встречных струй имеет более сложную структуру в сравнении со случаем натекания на преграду. В настоящей работе этот вопрос не рассматривается.

При расстоянии свыше $L/2 = 1,5$ автоколебательный режим скачкообразно сменяется описанным в [3] режимом с продольной асимметрией (область V, см. рис. 1). Перестройка волновой структуры завершается при достаточно больших значениях $L/2$ (в данном случае при $L/2 > 9$) формированием течения с продольной симметрией (VII) и невозмущенными первыми бочками у обеих струй. Как показали эксперименты, переход к этому режиму от течения с продольной асимметрией происходит в диапазоне $L/2 = 8,5 - 9$ и характеризуется автоколебаниями только одной, “короткой”, струи (режим VI). Вторая струя при этом взаимодействует с ПР своим основным участком. Таким образом, при увеличении L в струях с $Ma = 1$ наблюдается последовательное чередование стационарных и автоколебательных режимов.

Изменения волновой структуры в [3] объяснялись с помощью анализа кривых полного давления $P = p_{0w}/p_{\infty}$, измеренного в центре плоской пластины, установленной перпендикулярно оси струи на расстоянии $H = L/2$ (кривые в



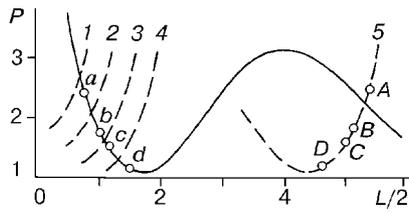


Рис. 2. Распределения давления во встречных струях при увеличении расстояния между соплами.

левой части рис. 1). Немонотонное изменение P с увеличением $L/2$ приводит к появлению одной, трех, пяти и снова одной точки пересечения кривых при их взаимном перемещении. Анализ, проведенный в [3], позволил выделить точки, соответствующие устойчивому полужению ПР на режиме VI. Точки равновесия на кривых $P(x)$, соответствующие приведенным волновым структурам, показаны на рис. 1.

Кривые $P(L/2)$ в центре плоской преграды, перпендикулярной оси струи, представленные совместно для двух встречных струй на рис. 2 (сплошная и штриховые линии), позволяют пояснить условия возникновения автоколебательных режимов и потерю осевой симметрии. Точки a, b, c, d и A, B, C, D соответствуют началу и концу режимов II и IV при взаимодействии струи с преградой для каждой из струй. Проследим за движением точек пересечения кривых давления при увеличении $L/2$. На рис. 2 этому соответствует перемещение штриховой линии от положения 1 к положению 5. В положении 1 она пересекает сплошную линию в области, соответствующей стабильным течениям с продольной симметрией и радиальным растеканием в обеих струях (режим I на рис. 1), в положении 2 пересечение соответствует режиму автоколебаний II. Кососимметричное взаимодействие III реализуется, когда точки пересечения лежат внутри границ b и c (положение 3), IV — то же, между c и d (положение 4). Как уже отмечалось, во всех этих режимах поверхность раздела является плоскостью симметрии. Но в положении 5 точка пересечения лежит на стационарной части левой кривой и автоколебательной части правой. Это означает, что течение в первой бочке одной струи, взаимодействующей с ПР своим основным участком, стационарно, а другая струя находится в режиме автоколебаний, как это показано на схеме волновой структуры, построенной по данным эксперимента (поле VI, рис. 1).

3. Увеличение разреженности, как отмечалось в [6], приводит к существенным изменениям волновой структуры, распределений параметров и, как следствие, деформации границ областей существования различных типов течения при взаимодействии струи с преградой. В случае встречного взаимодействия струй с уменьшением Re_L , как видно на рис. 1, границы всех характерных режимов смещаются в сторону меньших значений $L/2$. Наиболее заметно влияние снижения Re_L в диапазоне $L/2 = 0,8 - 1,1$.

Подвижность ПР, в отличие от твердой преграды, приводит к формированию в этой области кососимметричной волновой структуры, показанной на рис. 1 (поле III). Поверхность раздела, не являющаяся при этом плоскостью, в приосевой области наклонена под углом $\pm (75 - 80^\circ)$ к оси, причем оба положения ПР являются равновероятными и могут произвольным образом сменять друг друга во времени. Волновая структура струй деформируется в соответствии с положением ПР. Эксперименты с системой зеркал показали, что ПР произвольно расположена в пространстве. В отличие от автоколебаний, наблюдаемых во встречных струях при таких межсопловых расстояниях и $Re_L > 1000$, кососимметричное течение стационарно. Отметим, что наклон жесткой преграды в струе также стабилизирует течение. Это подтвердил специально поставленный эксперимент по натеканию струи на плоскую преграду в режиме автоколебаний при непрерывном уменьшении угла наклона преграды к оси струи от 90° . Было показано, что исчезновение автоколебаний и формирование течения с волновой структурой, подобной описанной выше, также

происходит в диапазоне углов $78 - 81^\circ$. Переход к стационарному течению четко фиксируется по наблюдаемой волновой структуре и изменению характера звука, воспроизводимого динамиком. В струях с $Re_L > 1000$ диапазон $L/2$ существования косой симметрии очень узок, при фиксированных начальных параметрах возникают спонтанные переходы от режима II к III и обратно. Время существования режимов колеблется от долей секунды при $Re_L > 500$ до десятков секунд при $Re_L < 200$. С уменьшением Re_L диапазон существования косой симметрии расширяется, режим стабилизируется во времени, однако угол наклона ПР к оси и в этом случае может спонтанно смениться на противоположный.

Для выяснения чувствительности наблюдаемого течения к несоосности сопел был проведен специальный эксперимент, в котором один из ресиверов монтировался не на общих направляющих, а на отдельном координатнике. Оказалось, что кососимметричное течение сохраняется даже при смещении этого ресивера на величину порядка диаметра сопла. Следовательно, перестройка к косо́й симметрии не может быть объяснена неточностью установки сопел. Следует отметить, что в пределах границ II – III – IV кривые измеренного давления торможения в центре преграды имеют одну точку пересечения, и формирование кососимметричной структуры не может быть объяснено только на основе их анализа.

На рис. 3 приведены полученные экспериментально распределения давления по плоской пластине, перпендикулярной оси струи. Как известно, их характер зависит от расстояния между соплом и преградой H и качественно изменяется от кривой с одним центральным максимумом к распределению с двумя периферийными максимумами ($M_a = 1, n = 70, Re_L = 1000$, кривые 1 – 3 соответственно для $H = L/2 = 0,6; 0,86; 1,05$). Режимы, отвечающие области II – IV на рис. 1, всегда имеют распределения давления с периферийными максимумами. Однако, как видно из рис. 4, распределения давления при этих значениях $L/2$ зависят от разреженности ($M_a = 1, n = 70, L/2 = 1,05$, кривые 1 – 3 для $Re_L = 1200, 600, 300$ соответственно). При уменьшении Re_L разница между давлением в центре и на периферии сокращается. “Платообразное” распределение давления на плоской преграде при значениях Re_L , соответствующих кососимметричной структуре во встречных струях, позволяет рассматривать пристеночную область ударного слоя струи как область с очень малыми скоростями, где газ практически находится в состоянии покоя. При аналогичных условиях на подвижной ПР встречных струй даже небольшие возмущения какого-либо параметра течения могут привести к нарушению существующего “безразличного” равновесия и переходу к кососимметричной структуре, что и

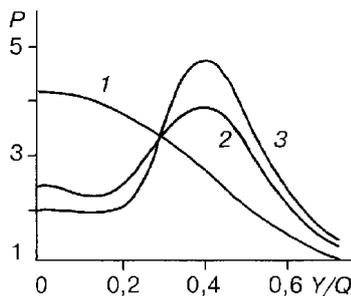


Рис. 3. Распределения давления по плоской преграде, перпендикулярной оси струи.

Поясн. см. в тексте.

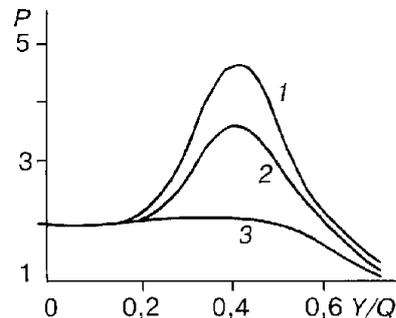


Рис. 4. Влияние разреженности на распределения давления по плоской преграде.

Поясн. см. в тексте.

наблюдается в экспериментах. В то же время причины периодического изменения угла наклона ПР на противоположный остаются неясными. При уменьшении Re_L область расстояний $L/2$, где распределения давления на жесткой преграде носят платообразный характер, расширяется, одновременно расширяется и область существования режима III. При $Re_L > 1000$ периферийные максимумы фиксируются во всем рассматриваемом диапазоне расстояний и режим III, как отмечалось выше, наблюдается в очень узком диапазоне $L/2$ и неустойчив во времени — практически во всем диапазоне $L/2 = 0,76 - 1,5$ реализуется осесимметричный автоколебательный режим.

4. Хорошо известно, что струи с $M_a > 1$ обычно имеют периодическую многоблочную волновую структуру. Давление торможения в центре плоской преграды, помещенной в такую струю перпендикулярно оси, с увеличением $H = L/2$ изменяется немонотонно (рис. 5, $M_a = 3,34$, $n = 17,2$; кривые 1 – 3 для $Re_L = 300, 180, 75$ соответственно). Каждый максимум на такой кривой связан с перемещением преграды в область следующей бочки струи. Амплитуда и изменения давления возрастает с уменьшением Re_L (кривые 1 и 3 на рис. 5). Абсолютный максимум давления перемещается от шестой – седьмой ко второй – третьей бочке струи.

Описанный характер кривых объясняет многие факты, наблюдаемые при встречном взаимодействии струй при $M_a > 1$. При относительно небольшом расстоянии ($L/2 < 1,5$), когда струи взаимодействуют своими первыми бочками, в экспериментах фиксируются те же режимы (в том числе II, III и IV), что и в случае с $M_a = 1$. Границы всех описанных выше режимов в координатах $L/2 - Re_L$ при $Re_L > 100$ в струях с $M_a > 1$ согласуются с соответствующими значениями для $M_a = 1$.

Благодаря отмеченной немонотонности кривых давления они могут иметь большое количество точек пересечения при больших значениях L . Каждая такая точка соответствует возможному положению ПР. Вместе с тем анализ устойчивости ПР [3] показал, что при увеличении L поверхность раздела всегда стремится занять крайнее к одному из сопел положение, как это показано на рис. 6, а. При относительном перемещении одного из ресиверов с постоянной скоростью положения ПР и центрального скачка одной струи изменяются немонотонно, циклически, в соответствии с многоблочной структурой другой струи (при переходе к каждой последующей бочке они скачкообразно приближаются к соплу).

При уменьшении Re_L диск Маха в свободной струе с $M_a > 1$ исчезает [6] и на ее начальном участке формируется регулярная X-образная конфигурация ударных волн со сверхзвуковой скоростью течения за ней (рис. 6, б). Поперечные распределения давления на жесткой преграде, установленной на расстоянии $L/2$, имеют в этом случае монотонный вид с единственным максимумом в

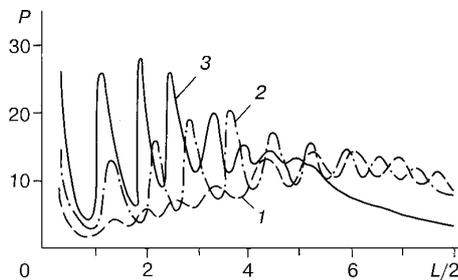


Рис. 5. Изменение давления в центре плоской преграды, установленной перпендикулярно оси струи с $M_a = 3,34$.

Поясн. см. в тексте.

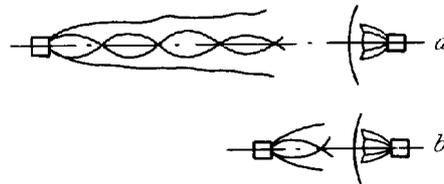


Рис. 6. Схема волновой структуры струй, истекающих из сопел с $M_a > 1$.

Поясн. см. в тексте.

центре. Это приводит к изменению в последовательности смены режимов во встречных струях. Автоколебательные продольносимметричные режимы исчезают, и при увеличении L течение с продольной симметрией сразу сменяется асимметричным с невозмущенной первой бочкой и X -образной конфигурацией у одной струи и автоколебательным режимом у другой.

Полученные результаты дают возможность заключить, что исследованное течение обладает некоторыми новыми, зачастую неожиданными свойствами, позволяющими расширить круг практических приложений сверхзвуковых струйных течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fujimoto T. and Ni-Imi T. Three dimensional structures of interacting free jets // Progress in astronautics. — 1988. — Vol. 116. — P. 391 – 406.
2. Ni-Imi T., Fujimoto T. and Ijima K. Structures of two opposed supersonic free jets with different source pressure // Rarefied Gas Dynamics: Book of Abstr. of 18-th Int. Symp. Vancouver, Canada, July 26–31, 1992.
3. Favorsky V.S., Savin A.V., Shatalov I.V., Sokolov E.I. Nonuniqueness of gas dynamic structures in two supersonic opposing underexpanded jets interactions // Rarefied Gas Dynamics: Proc. of the 19-th Int. Symp. on RGD. Vol. 2. — Oxford: Univ. Press, 1995. — P. 1328 – 1334.
4. Соколов Е.И., Шаталов И.В. Влияние вязкости на течение в циркуляционной зоне перед плоской преградой, перпендикулярной оси сверхзвуковой недорасширенной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1983. — № 3. — С. 47 – 52.
5. Глазнев В.Н. О механизме обратной связи в автоколебаниях при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду // ПМТФ. — 1991. — № 4. — С. 59 – 63.
6. Соколов Е.И., Шаталов И.В. Параметры подобия течения при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной разреженной струи с перпендикулярной плоской преградой // Динамика неоднородных и сжимаемых сред. — Л.: Изд. ЛГУ, 1984. — С. 175 – 183.
7. Гинзбург И.П., Соколов Е.И., Усков В.Н. Типы волновой структуры при взаимодействии недорасширенной струи с безграничной плоской преградой // ПМТФ. — 1976. — № 1. — С. 45 – 50.

Статья поступила в редакцию 15 октября 1997 г.