



УДК 534.2

И. В. Вовк, В. С. Малюга

Контроль излучения звука потоком в нерегулярном канале

(Представлено академиком НАН Украины В. Т. Гринченко)

Рассматриваются методы управления потоком в нерегулярном канале с двумя сужениями, а также методы управления эффективностью излучения звуковой энергии таким потоком. Показано, что изменение геометрии области между сужениями и расположения отверстий сужений может привести к качественному изменению картины течения и, как следствие, к увеличению или уменьшению на порядок излучаемой потоком звуковой энергии.

Принято считать, что нерегулярными каналами являются каналы, которые имеют геометрические или физические локальные особенности. Например, излом, резкие расширения или сужения, разветвления, изменения физических свойств стенок и т. д. Нас будут интересовать нерегулярные каналы, у которых имеются два резких сужения, отстоящих друг от друга на расстоянии, сравнимом с шириной канала. Хорошо известно, что при движении по такому каналу потока жидкости или газа в результате взаимодействия потока с этими сужениями могут возникать значительные звуковые колебания [1–4]. Необходимо сказать, что каналы подобного рода представляют интерес как для физики, так и для техники.

Исторически сложилось так, что вначале каналы с двумя сужениями нашли применение в кустарных устройствах, с помощью которых охотники, создавая характерный свист, приманивали птиц (такое устройство называется манок или пйщик [4]). А позже — при создании различных сигнальных свистков и мощных гудков в железнодорожном и морском транспорте. Очевидно, что при создании таких свистков и гудков необходимо добиваться максимальной эффективности преобразования энергии потока в звуковую энергию.

Другой, сравнительно новой областью техники, в которой нашли применение каналы с двумя сужениями, являются твердотопливные ракетные двигатели [5–7]. Именно в области между сужениями происходит горение топлива, а роль сужений выполняют подвижные заслонки, которые изменяют сечение сужений и тем самым регулируют величину тяги ракетного двигателя. Однако при этом поток горячих газов может возбудить мощные звуковые колебания и, соответственно, вибрации заслонок, что в свою очередь может привести

© И. В. Вовк, В. С. Малюга, 2015

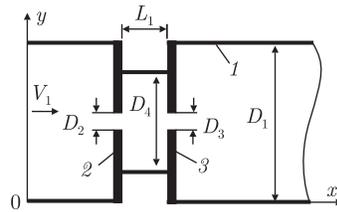


Рис. 1. Нерегулярный канал с двумя сужениями: 1 — стенки канала; 2 — первое (по потоку) сужение; 3 — второе сужение

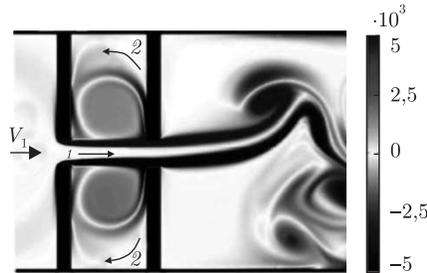


Рис. 2. Поле завихренности течения при докритических числах Рейнольдса

к нарушению штатных режимов подачи топлива и величины тяги и даже к разрушению заслонок. Совершенно очевидно, что при создании таких ракетных двигателей необходимо добиваться минимальной эффективности преобразования энергии потока в звуковую энергию или по возможности вообще недопущения возбуждения звуковых колебаний.

Цель настоящей работы — показать, как с помощью рационального выбора геометрических параметров области между сужениями можно управлять потоком и, соответственно, уровнем излучаемой им звуковой энергии. Эта проблема будет решаться на основе численного решения уравнения Навье–Стокса для потока в канале с двумя сужениями и последующего анализа полученных количественных данных.

Теория. Рассмотрим нерегулярный плоский канал с двумя сужениями, отстоящими друг от друга на расстоянии, сравнимом с шириной канала (рис. 1). Будем полагать, что поток, движущийся со скоростью V_1 , набегаёт на сужения со стороны отрицательных значений оси Ox . В работах [8, 9] весьма подробно описан метод оценки гидродинамических и звуковых характеристик потока в подобных каналах. Поэтому на нем мы останавливаться не будем, а лишь укажем, что задача решается в два этапа: на первом этапе численным методом конечных объемов решается нестационарная система уравнений Навье–Стокса, а на втором этапе на основе вычисленных гидродинамических характеристик оценивается генерируемое потоком звуковое поле. При этом существенно используются следующие гипотезы: мощность звука, порождаемая потоком, мала по сравнению с мощностью набегающего на сужения потока и порожденный звук не влияет на характер самого потока.

Анализ численных результатов. В работах [4, 8, 9] показано, что, начиная с некоторых критических значений чисел Рейнольдса, в области между сужениями возникают гидродинамические автоколебания. Для того чтобы понять физические причины их появления, рассмотрим типичное поле завихренности, возникающее в канале с двумя одинаковыми сужениями при движении потока с докритическими значениями чисел Рейнольдса (рис. 2). Как видно, первое сужение формирует струю 1, на поверхностях которой обра-

зуются два (верхний и нижний) ламинарных пограничных слоя. По мере движения струи в области между сужениями она естественно расширяется и расширяются пограничные слои. Это приводит к тому, что при входе струи во второе сужение она расщепляется. Одна (центральная) часть проходит в отверстие второго сужения, а вторая часть (обозначена стрелкой 2) движется вдоль стенок второго сужения канала и стенок первого сужения в обратном направлении и, в конечном итоге, достигает начала (корня) струи.

Таким образом, мы имеем гидродинамическую систему с четко выраженной обратной связью и возникновение автоколебаний естественно будет существенно зависеть от мощности обратного потока 2 и его фазовых характеристик. Здесь необходимо сразу отметить, что в отличие от электронных приборов (например, генераторов сигналов) с каналами обратных связей, где имеется возможность сравнительно точно подобрать уровень и фазу сигнала обратной связи для обеспечения устойчивых автоколебаний, в рассматриваемой гидродинамической системе осуществить это весьма непросто. И связано это с тем, что в нашем случае поток 2 распределен в пространстве, и в каждой точке этого пространства он характеризуется своим значением скорости, давления и завихренности. Поэтому к корню струи поток 2 доставляет смесь частиц среды, имеющих разные гидродинамические характеристики, и ответить заранее на вопрос — возникнут автоколебания или нет и какова будет их мощность, весьма сложно. Тем не менее естественно предположить, что изменяя геометрические характеристики области между сужениями и самих сужений, можно эффективно влиять на поток обратной связи и тем самым влиять на энергетику автоколебаний и генерируемый ими уровень звуковых колебаний. Покажем эту возможность на конкретных примерах.

На рис. 3, а приведено поле завихренности при $Re = 4000$ (число Рейнольдса вычислялось по длине L_1). При выбранных геометрических параметрах энергии в потоке обратной связи 2 достаточно, чтобы в области между сужениями влиять на корень струи, в результате чего в сдвиговых слоях образуется характерная последовательность вихрей. При этом ряды вихрей в верхнем и нижнем сдвиговых слоях располагаются относительно друг друга в шахматном порядке. Набегая на второе сужение, эти вихри вызывают антисимметричные практически гармоничные колебания вертикального профиля скорости во втором сужении, в результате чего возбуждаются звуковые волны. Поскольку колебания профиля скорости антисимметричны, звуковой источник в сужении имеет дипольный характер. И хотя дипольные источники не являются эффективными источниками звука, тем не менее, учитывая большую мощность потока газов в камерах сгорания твердотопливных двигателей ракет, преобразование даже небольшой доли энергии этого потока в звуковую энергию может вызвать в камерах сгорания звуковые колебания, достаточные для разрушения заслонок, регулирующих тягу двигателей, о чем неоднократно указывалось в [5–7].

В работе [10] установлено, что увеличение отношения L_1/D_1 приводит к разрушению упорядоченной вихревой структуры в области между сужениями и, соответственно, к резкому снижению излучаемой звуковой энергии. Действительно, при сравнении рис. 3, а и рис. 3, б становится очевидным, что уже при $L_1/D_1 = 0,45$ (при остальных равных параметрах) потоки обратной связи в верхней и нижней половинах области между сужениями становятся совершенно разными и не стремящимися к корню струи, вследствие чего упорядоченная вихревая структура в сдвиговых слоях практически полностью разрушается. Дополнительные расчеты показывают, что в этом случае колебания вертикальных профилей скорости во втором сужении становятся беспорядочными и звуковая энергия снижается почти на порядок.

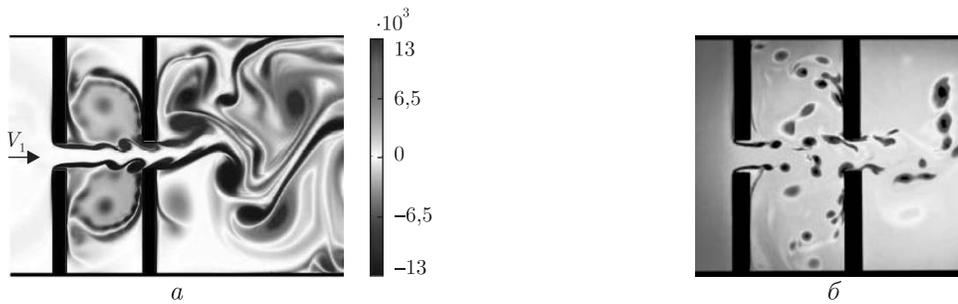


Рис. 3. Поле завихренности течения: *a* — при $Re = 4000$, $L_1/D_1 = 0,32$, $D_4/D_1 = 1$, $D_1/D_2 = 9$, $D_2 = D_3$; *б* — при $L_1/D_1 = 0,45$



Рис. 4. Поле завихренности течения: *a* — при $a/D_1 = 0,25$; *б* — $D_4/D_1 = 0,33$ (остальные параметры такие же, как на рис. 3, *a*)

Можно указать еще два способа, позволяющие существенно ослабить обратную связь, что приведет к резкому снижению энергии звукообразования. Первый способ очевиден и заключается в расширении второго сужения, т. е. к увеличению отношения D_3/D_2 . Уже при $D_3/D_2 \geq 1,3$ струя практически не будет расщепляться на втором сужении и будет полностью проскакивать через сужение, не образуя поток обратной связи.

Второй способ предполагает смещение сужений относительно оси рассматриваемого канала. В этом случае геометрия верхней и нижней областей, где существуют потоки обратной связи, будут разными, а значит, время их прихода к корню струи будет не коррелировано, следовательно, будут отсутствовать условия для возбуждения автоколебаний. В качестве примера на рис. 4, *a* представлено поле завихренности при смещении первого сужения вверх, а второго сужения — вниз относительно оси симметрии канала. Здесь хорошо видно, что в сдвиговых слоях струи упорядоченных вихревых структур не наблюдается и они имеют хаотичный характер. Поэтому и звуковые эффекты будут незначительны.

До сих пор мы обсуждали вопрос снижения уровня излучения звука в рассматриваемом канале. Теперь рассмотрим возможности его увеличения. Выполненный выше анализ позволяет предположить, что для повышения эффективности преобразования энергии потока в звуковую энергию необходимо обеспечить достаточно сильный и устойчивый поток обратной связи. Одним из очевидных путей является уменьшение объема области между сужениями, например, за счет уменьшения размера D_4 . В качестве иллюстрации такой возможности на рис. 4, *б* приведено поле завихренности при $D_4/D_1 = 0,33$. Здесь хорошо видно, что в сдвиговых слоях струи образуются симметричные пары вихрей и поэтому вертикальные профили скорости во втором сужении также будут симметричными относительно оси симметрии рассматриваемого канала. А это в свою очередь обеспечивает условия

появления во втором сужении звукового источника монополюсного типа. Дополнительные расчеты показали, что при такой геометрии канала уровень излучаемого звука увеличился более чем на порядок по сравнению с каналом, изображенным на рис. 3, а.

Таким образом, в работе рассмотрены методы управления потоком и излучаемой им звуковой энергией в нерегулярном канале, содержащем два сужения. Показано, что одним из эффективных методов является рациональный выбор геометрии области между сужениями и расположением отверстий сужений. В частности, установлено, что для снижения излучаемой потоком звуковой энергии необходимо увеличивать объем области между сужениями и сдвигать отверстия сужений относительно оси симметрии канала. И, наоборот, для увеличения излучаемой потоком звуковой энергии необходимо уменьшать объем области между сужениями.

Проведенный качественный анализ дает важную информацию для организации вычислительных процедур, обеспечивающих получение количественных оценок характеристик звукового поля.

1. *Anderson A. B.* Structure and velocity of the periodic vortex-ring flow pattern of a Primary Pfeifenton (Pipe ton) jet // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1955. – **27**, No 6. – P. 1048–1053.
2. *Rockwell R., Schachenmann A.* Self-generation of organized waves in an impinging turbulent jet at low Mach number // *J. Fluid Mech.* – 1982. – **117**. – P. 425–441.
3. *Hourigan K., Welsh M. C., Tompson M. C., Stokes A. N.* Aerodynamic sources of acoustic resonance in a duct with baffles // *J. Fluids Struct.* – 1990. – **4**. – P. 345–370.
4. *Вовк И. В., Гринченко В. Т.* Звук, рожденный потоком. – Киев: Наук. думка, 2010. – 221 с.
5. *Brown R. S., Dunlap R., Young S. W., Waugh R. C.* Vortex shedding as a source of acoustic energy in segmented solid rockets // *J. Spacecraft Rockets.* – 1981. – **18**, No 4. – P. 312–319.
6. *Carmicino C.* Acoustic, vortex shedding and low-frequency dynamics interaction in an unstable hybrid rocket // *J. Propulsion Power.* – 2009. – **25**, No 6. – P. 1322–1335.
7. *Boyer G., Casalis G., Estivaleres J.-L.* Stability analysis and numerical simulation of simplified solid rocket motors // *Phys. Fluids.* – 2013. – **25**, No 6. – 084109.
8. *Вовк И. В., Гринченко В. Т., Малюга В. С.* Особенности движения среды в каналах со стенозами // *Прикл. гідромех.* – 2009. – **11**, № 4. – С. 17–30.
9. *Вовк И. В., Малюга В. С.* Звуковое поле, генерируемое потоком в канале со стенозами // *Там само.* – 2012. – **14**, № 1. – С. 23–48.
10. *Басовский В. Г., Вовк И. В., Вовк О. И.* О возможности генерирования тональных звуковых колебаний потоком воздуха в бронхах со стенозом // *Акустич. вісник.* – 2003. – **6**, № 1. – С. 3–21.

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 26.09.2014

І. В. Вовк, В. С. Малюга

Контроль випромінювання звуку потоком у нерегулярному каналі

Розглянуто методи керування потоком у нерегулярному каналі з двома звуженнями, а також методи керування ефективністю випромінювання звукової енергії таким потоком. Показано, що змінювання геометрії області між звуженнями і розташування отворів може спричинити якісні зміни картини течії, а отже привести до збільшення або зменшення на порядок звукової енергії, що випромінюється потоком.

I. V. Vovk, V. S. Malyuga

Control over the sound generation by a flow in the irregular channel

This article addresses the methods of flow control in an irregular duct with two contractions and the methods of efficiency control of the sound radiation by a flow. It is shown that the variation of the domain between the contractions, as well as the variation of the hole positions, may cause some qualitative changes in the flow character. In this case, the acoustic energy radiated by the flow may be changed by an order in magnitude.