

## КОЛЕБАНИЯ ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ

<sup>1</sup>Засухин О.Н., <sup>2</sup>Булат П.В., <sup>3</sup>Продан Н.В.<sup>1</sup>Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова;<sup>2</sup>ООО «ВНХ-Проект» НОЦ «Механика», Санкт-Петербург, Россия e-mail: kolinti@mail.ru

Дан обзор экспериментальных исследований низкочастотных колебаний, которые могут возникать при сверхзвуковом обтекании донной области. Приведены работы, в которых низкочастотные колебания впервые были обнаружены. Рассмотрены концепция квазистационарных колебаний, разработанная советскими авторами. Приведены сведения о различных явлениях (акустических, вихревых, турбулентных, расходных, вызывающих пульсации донного давления. Рассмотрены основные гипотезы возбуждения низкочастотных колебаний. Приведены наиболее важные сведения о режимах низкочастотных колебаний донного давления в канале.

**Ключевые слова:** донное давление, низкочастотные колебания, релаксационные колебания, расходный механизм поддержания колебаний

## BASE PRESSURE OSCILLATIONS

<sup>1</sup>Zasuhin O.N., <sup>2</sup>Bulat P.V., <sup>3</sup>Prodan N.V.<sup>1</sup>Baltiysky State Technical University of Ustinov;<sup>2</sup>«VNH-Project» ltd SEC «Mechanics», St. Petersburg, e-mail: kolinti@mail.ru

We consider different methods of calculation of bottom pressure based on the concept of dividing streamline. The concept of quasi-stationary fluctuations, developed by Soviet authors. The information about various phenomena (acoustic, vortex, turbulence, consumables), causing ripple bottom pressure. The main hypothesis of excitation of low-frequency vibrations. Are the most important information on modes of low frequency oscillations in the channel bottom pressure.

**Keywords:** bottom-pressure, low-frequency oscillations, relaxation oscillations, consumable mechanism for maintaining the oscillations

Сложное явление, возникающее в канале с внезапным расширением потока – **низкочастотные колебания**. Они сопровождаются мощным акустическим излучением, что широко используется в различных технологических установках в области металлургии и упрочнения изделий из металлов. Нестационарные явления, сопровождающие истечение сверхзвуковой струи в канал с герметизированной донной областью, изучались в течение длительного времени [6], как экспериментально, так и с помощью разработанных математических моделей [20]. Невыясненным остается вопрос о том, каков механизм поддержания низкочастотных колебаний.

### Экспериментальное исследование колебаний донного давления

Комплекс работ по исследованию течений в плоских и осесимметричных каналах для круглых и кольцевых струй провел Юнговски с соавторами [7–9], [11–19]. Результаты визуальных исследований течений с помощью интерферограмм в плоских прозрачных каналах и измерения с помощью датчиков позволили ему выявить существование колебательных и устойчивых режимов изменения донного давления и перестройки волновой структуры. К устойчивым режимам он отнес режим течения с открытой донной областью, режим присоединения к стенке канала основного участка сверхзвуковой струи и натекания

границы первой бочки на стенку, то есть режимы, соответствующие двум различным диапазонам изменения полного давления. В результате представления о характерном графике зависимости донного давления  $P_d$  от полного давления перед соплом  $P_0$  приобрели современный вид (рис. 1).

Большое внимание уделялось в исследованиях и акустическим аспектам. Проведенный расчет частоты колебательного режима изменения донного давления и генерации излучения звука как для четвертьволнового вибратора с учетом осредненной переменной плотности газа, истекающего из сопла в канал, показал удовлетворительное совпадение с экспериментом.

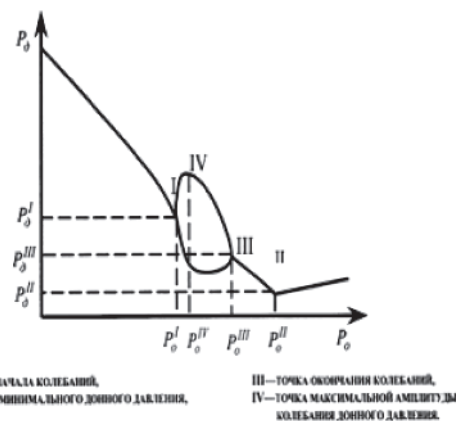


Рис. 1. Типичная зависимость донного давления от полного давления перед соплом

### Неоднозначность как возможный механизм поддержания колебаний

Гогиш Л.В. и Степанов Г.Ю. установили, что при наличии вдува или отсоса из донной области течение в возмущенном скачком ближнем следе при внешнем обтекании остается двузначным во всем диапазоне значений донного давления, и показали расчетным путем возможность существования квазистационарных колебаний давления. В работе [5] механизм возбуждения рассматриваемых колебаний связан, предположительно, с крупномасштабными турбулентными возмущениями в следе за телом (уступ в канале) типа больших вихрей, вызывающими начальную деформацию профиля скорости на начальном участке ближнего следа, исходя из предложенной гипотезы, авторы [5] считали, что колебания донного давления могут иметь нерегулярный характер, а амплитуда их не превышает разности давлений, соответствующих двум стационарным состояниям следа. Они показали, что если представить турбулентное, отрывное течение в виде спектра случайных состояний потока, то вероятность нахождения в каком-либо состоянии и характер перехода между ними связаны с определенным физическим механизмом возбуждения – турбулентным, акустическим, расходным и прочими (по отдельности или в совокупности).

#### Различные виды пульсаций донного давления

Рассматривая спектр частот пульсаций донного давления в сверхзвуковых отрывных течениях (с фиксированной точкой отрыва) можно отметить следующие характерные виды пульсаций:

- а) турбулентные пульсации;
- б) акустические пульсации;
- в) вихревые пульсации (большие вихри);

г) квазистационарные расходные пульсации релаксационного типа.

Наличие этих видов пульсаций свидетельствует о двузначности стационарного течения, которая может проявляться либо в невязком потоке, либо в вязком слое. Различные виды такой двузначности и связанные с ней гистерезис и низкочастотные пульсации, обнаруженные при экспериментальных исследованиях плоских моделей кольцевых сопел [5], присущи и осесимметричным течениям в каналах.

Результаты ряда работ, в которых исследовались пульсации в различного типа сопловых компоновках [3, 4], подтверждают изложенное выше. Циклическая перестройка волновой структуры сопровождается генерацией внешнего акустического поля, управление частотой которого осуществляется изменением полного давления  $P_0$ , числа Маха на срезе сопла и длины канала  $l_{тр}$  [3].

Грабитцем [10] была предпринята попытка рассчитать частоту колебательного режима с помощью принятой им математической модели с различными законами обратной связи, между наружным и донным давлением в колебательном процессе. Проведенные расчеты показали удовлетворительное совпадение с экспериментом для отдельных режимов истечения.

#### Гипотезы о природе низкочастотных колебаний

Ранее выдвигались разнообразные гипотезы о природе колебаний и причинах их возникновения. Систематические исследования, проведенные в БГТУ «Военмех» в 80-е и 90-е годы, опровергли большинство из них. Выяснилось, что струя в канале не совершает азимутальных и крутильных колебаний. Не существует также боковых колебаний, подобных тем, что наблюдаются в плоском случае, когда поток прилипает то к одной, то к другой стенке (рис. 2).

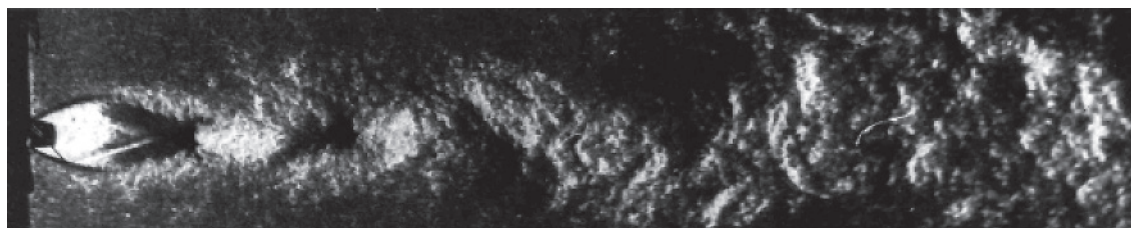


Рис. 2. Боковая неустойчивость струи в плоском канале

Не подтвердилась и акустическая теория, утверждающая, что за возникновение и поддержание колебаний отвечают волны сжатия, распространяющиеся в донную область из области натекания границы струи на стенку и вызывающие, по мнению

ряда исследователей, возмущение потока у кромки сопла. Эксперименты показали, что низкочастотные колебания имеют частоту на порядок меньшую, чем предсказывает акустическая теория, а сами они могут возникать и в случае натекания на преграду

струи, находящейся в сверхзвуковом спутном потоке, когда акустическая обратная связь отсутствует по определению.

#### Основные экспериментальные сведения о низкочастотных колебаниях

В процессе колебаний течение остается строго осесимметричным, пространственные эффекты не имеют существенного значения. В каналах с соплами с  $M_a \leq 1,5$  низкочастотные колебания обычно не возникают.

Колебания носят квазистационарный характер, т.е. газодинамические функции  $F_d$  не зависят явным образом от времени, а определяются только донным давлением, которое, в свою очередь, зависит от расхода газа, эжектируемого из донной области и втекающего в нее. Если взять  $P_d$  и  $P_0$ , соответствующие какой-либо точке колебательного цикла, рассчитать по этим данным геометрию ударно-волновой структуры струи, как в стационарном случае, и сравнить ее с фотографиями, то совпадение будет хорошим.

Колебания при увеличении  $P_0$  всегда возникают с отличной от нуля ампли-

тудой, причем первый цикл начинается с уменьшения  $P_d$ . Амплитуда колебаний  $P_d$  растет  $\sim t^{1/2}$ , что дает основание говорить о существовании субкритической бифуркации Хопфа от стационарного положения к предельному циклу, что полностью соответствует квазистационарной модели колебательного цикла с двумя стационарными положениями: устойчивым и неустойчивым.

Механизм возбуждения и поддержания колебаний – расходный. Другие факторы не имеют принципиального значения. В канале с соплом  $M_a = 1$  колебания в обычных условиях не возникают. В ряде экспериментов [1, 2] для возбуждения колебаний донный объем был соединен полостью с областью натекания струи на стенку канала, так что в него могло поступать дополнительное количество газа, что приводило к возбуждению колебаний.

Колебательный цикл характеризуется периодическим изменением не только донного давления, но и всей газодинамической структуры течения (см. кинограмму цикла составных колебаний на рис. 3).

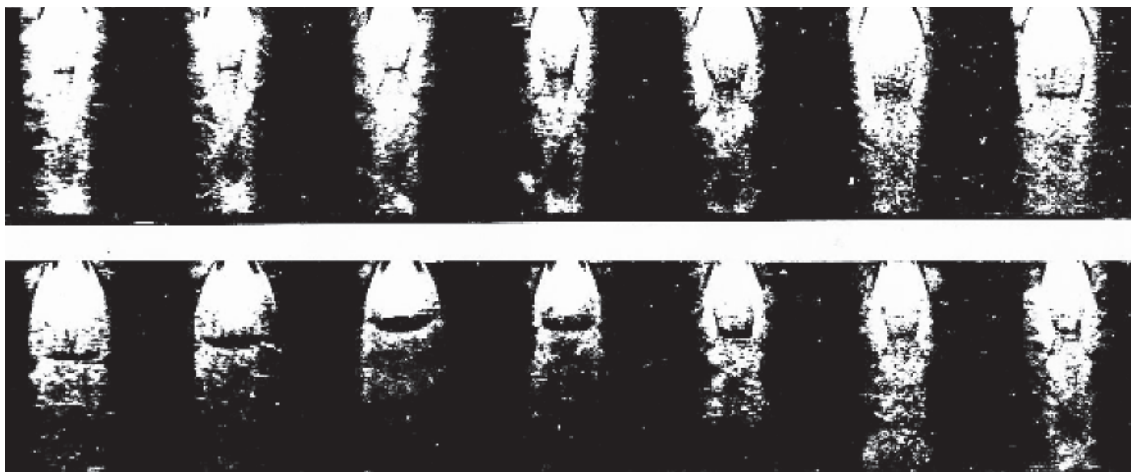


Рис. 3. Кинограмма колебательного цикла на режиме составных колебаний

Таким образом, автоколебательный режим является существенной особенностью течения в канале с внезапным расширением. Амплитудно-частотная характеристика определяется многочисленными конструктивными и технологическими параметрами установки.

Акустическое излучение на автоколебательном режиме и режиме течения с открытой донной областью имеет частоты дискретного тона, многократно превосходящие по амплитуде широкополосную составляющую. Режим снижения уровня шума характеризуется практически отсутствием дискретных тонов и низкой величиной

интегрального уровня излучаемого шума. Все это создает обширные возможности по практическому использованию феномена автоколебаний, управлению его характеристиками и глушению шума сверхзвуковых струй.

#### Заключение

В трех частях настоящей статьи дан достаточно полный обзор фундаментальных исследований проблемы донного давления. Приведены ссылки на все основные публикации, монографии и обзоры, повлиявшие на развитие методики расчета донного давления, а также представлений о физике яв-

лений, происходящих в канале с внезапным расширением, соплах с разрывом образующей, течений в окрестности донного среза летательного аппарата. Данный обзор будет полезен специалистам, работающим над созданием новых высокоскоростных транспортных систем.

### Список литературы

1. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Комплексная методика расчета струи в канале с внезапным расширением при наличии переходных процессов на неавтономных режимах // Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: тезисы докладов XVIII Международного семинара, (Санкт-Петербург, 21–23 июня 2000 г.). – СПб., 2000. – С. 48.
2. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Механизмы нестационарных процессов в канале с внезапным расширением: тезисы докладов XV Всесоюзного семинара по газовым струям, (Санкт-Петербург, 25–27 сент. 1990 г.). – СПб., 1990. – С. 21.
3. Гинзбург И.П., Жигач С.И., Засухин О.Н. Способ возбуждения колебаний сверхзвуковой газовой струи и звуковых колебаний в окружающем пространстве: А.С. Л 708398. – 1980. – Бюл. № 1.
4. Гинзбург И.П., Жигач С.И., Засухин О.Н. Способ глушения шума сверхзвуковой газовой струи и устройство для его осуществления. Заявка № 2503709 / 08. – 1977.
5. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. Квазиодномерная теория взаимодействия турбулентного следа со сверхзвуковым потоком в канале и струе: науч. тр. / Институт механики МГУ. – 1971. – № 11.
6. Крокко Л. Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений: кн. Основы газовой динамики; под ред. Г. Эмонса. – М, 1963. – С. 269–274.
7. Колебания сверхзвукового потока вследствие резкого увеличения поперечного сечения канала / Г.Э.А. Мейер, Г. Грабитц, В.М. Юнговски, К. Дж. Витчак, Дж.С. Андерсон // РТК. – 1980. – №5. – С. 54–56.
8. Flow oscillation in a duct with a rectangular cross-section / J.S. Anderson, W.M. Jungowski, W.J. Hiller, G.E.A. Meier // of Fluid Mechanics. – 1977. – 79, Pt 4. – P. 769–784.
9. Strommungsswingungen in einem Kanal mit Querschnittsprung / J.S. Anderson, W.M. Jungowski, W.J. Hiller, G.E.A. Veier // M.P.J. – Berlin, 1976. – № 10.
10. Grabitz G. Model calculations of selfexcited oscillations in transonic flow in a duct with an abrupt enlargement // Lect. Notes Phys. – 1979. – № 90. – P. 268–273.
11. Jungowski W.M. Influence of closely located solid surfaces on the sound spectra radiated by gas jets // Mechanics

of Sound Generation in Flows, Symposium Gottingen / Germany. – 1979. – P. 116–122.

12. Jungowski W.M. Investigation of flow pattern, boundary conditions and oscillation mechanism in a compressible flow through sudden enlargement of a duct // Warsaw, Tech, Only. Publ. – 1968. – № 3. – P. 79.

13. Jungowski W.M. On the flow in a sudden enlargement of a duct // Fluid Dynamics Transactions. – 1969. – Vol. 4. – P. 231–241.

14. Jungowski W.M. On the pressure oscillating in a sudden enlargement of a duct section // Fluid Dynamics Transaction. – 1967. – №1. – P. 735–741.

15. Jungowski W.M. Some self induced supersonic flow oscillations // Progr. Aerospace Sci. – 1978. – Vol 18. – P. 151–175.

16. Jungowski W.M. Theora abliczenie i badanie strumienicy gazowcy o zmiennym Wydatki // Arch. Bud. Masz. – 1976. – 23(№ 3). – P. 345–358.

17. Jungowski W.M., Witczak K.J. Properties of an annular jet generating discrete frequency noise. Archives of Mechanics. – 1976. – Vol 28, № 6-6. – P. 847–854.

18. Oscillations of the supersonic flow downstream of a abrupt increase in a duct cross-section / G.E.A. Meier, G. Grabitz, W.M. Jungowski, K.J. Witczak, J.S. Anderson // AIAA J. – 1980. – Vol. 18, № 4. – P. 394–395.

19. Oscillations of the supersonic flow downstream of an abrupt Increase in duct cross section / G.E.A. Meier, G. Grabitz, W.M. Jungowski, K.J. Witczak, J.S. Anderson // Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut fur Stromungsforschung und der Aerodynamischer Versuchsanstalt. – 1978. – №65.

20. Neumann E.P., Lustwerk F. Supersonic diffusers for wind tunnels // J. appl. Mech. – 1949. – 16(№2). – P. 195.

### Рецензенты:

Усков В.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры гидроаэромеханики, математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург;

Матвеев С.К., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой гидроаэромеханики, математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург;

Арютков Б.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой прикладной механики, профессор ФГОУ ВПО «Нижегородская ГСХА», г. Нижний Новгород.

Работа поступила в редакцию 01.08.2011.