

УДК 532.529 + 629

О НИЗКОЧАСТОТНЫХ РАСХОДНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ

¹Булат П.В., ²Продан Н.В.

¹ООО «НОЦ «Динамика»;

²ООО «Проблемная лаборатория «Турбомашини», Санкт-Петербург, e-mail: kolinti@mail.ru

Рассмотрена важная проблема возникновения низкочастотных колебаний в отрывных течениях, связанных с донным давлением. Определена актуальность поставленной задачи, которая встает у проектировщиков сложных технических устройств: сопловых блоков, эжекторов, камер сгорания со сверхзвуковым горением, фронтных устройств гиперзвуковых летательных аппаратов, детонационных двигателей, внутренних отсеков вооруженных летательных аппаратов, форсажных камер двигателей со сверхзвуковым горением. Кратко изложены основные сведения о механизме и характере низкочастотных колебаний. Показана связь колебаний с понятием дисбаланса расходов масс газа, эжектируемых из донного объема и втекающих в него из области взаимодействия потока со стенкой канала. Приведены результаты теоретического исследования трех видов низкочастотных колебаний, следующих друг за другом по мере повышения полного давления перед соплом. Получены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие основные выводы о природе и механизме колебаний, сделанные ранее на основе экспериментальных исследований.

Ключевые слова: отрывные течения, донное давление, расходные колебания, релаксационные колебания, течения с внезапным расширением потока

ON THE LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS OF EXPENDITURE BASE PRESSURE

¹Bulat P.V., ²Prodan N.V.

¹ «SEC Dynamics» ltd;

²«Problem Laboratory «Turbomachine» ltd, St. Petersburg, e-mail: kolinti@mail.ru

Considered an important issue of low-frequency fluctuations in separated flows associated with the base pressure. The relevance of the task, which set to the designers of complex technical devices, such as nozzle unit, ejectors, combustion chambers with a supersonic combustion, front device hypersonic aircraft, detonation engines, internal weapons bays of aircraft engines with afterburners supersonic combustion was determined. Summarizes the key information about the mechanism and nature of the low-frequency vibrations. The relationship with the concept of oscillation of mass imbalance cost of gas ejected from the bottom and the volume flowing into it from the interaction of the flow channel wall. The results of theoretical investigations of the three types of low-frequency oscillations, following each other with increasing total pressure before the nozzle. The results of numerical experiments, confirming the main conclusions of the nature and mechanism of oscillations, which were previously made on the basis of experimental studies, were obtained.

Keywords: separated flows, base pressure, gas flow rate fluctuations, relaxation oscillations, the flow with sudden expansion flow

Актуальность исследования течения в канале с внезапным расширением определяется тем, что выявленные в данном простом случае режимы повторяются в более сложных технических устройствах, в которых также

имеются отрывные течения. Например, это могут быть сопловые блоки, эжекторы, камеры сгорания со сверхзвуковым горением, фронтные устройства двигателей гиперзвуковых летательных аппаратов (рис. 1).

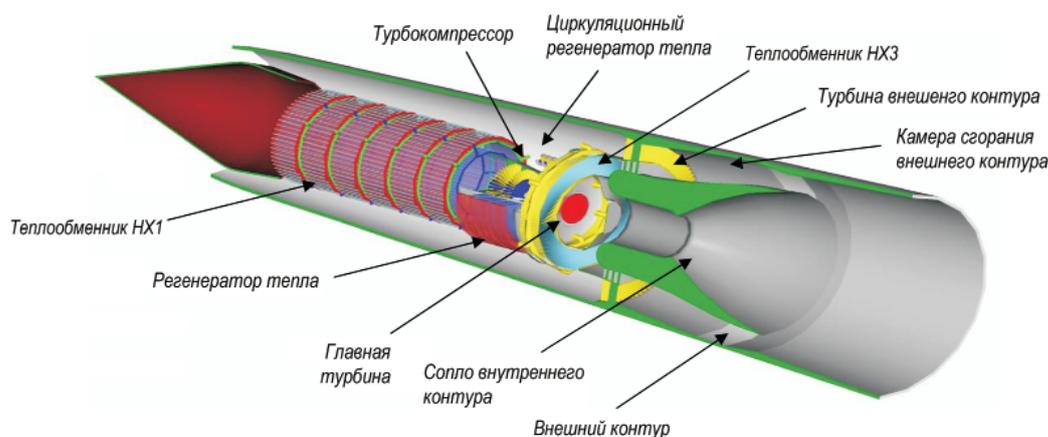


Рис. 1. Двухконтурный воздушно-реактивный двигатель с разрывом образующей сопла гиперзвукового летательного аппарата

Существуют и другие технические приложения течений с внезапным расширением (ТВР): внутренние отсеки вооружений летательных аппаратов, форсажные камеры двигателей со сверхзвуковым горением и т.п. Всех их объединяет одна общая техническая проблема – отрывное сверхзвуковое течение и связанное с ним донное давление.

Донным давлением называется среднее давление P_d в донной области, оно определяет картину течения вниз по по-

току. В фундаментальном труде А. Гогиша и Ю. Степанова [1] теоретически и экспериментально изучены вопросы влияния неравномерности течения в донной области на качественный характер ТВР. Показано, что модель изобарического течения в донной области вполне удовлетворяет потребностям практики. Обзор экспериментальных работ по проблеме донного давления и история вопроса приведен в статье [2].

Исследования были проведены на установке, представленной на рис. 2.

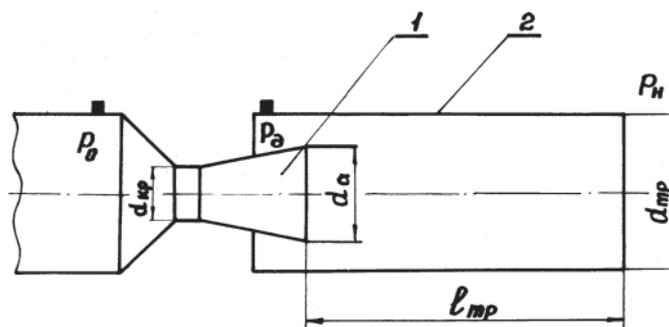


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
1 – сопло; 2 – цилиндрический канал

При заданной геометрии сопла и канала течение полностью определяется множествами газодинамических переменных f_0 параметров торможения рабочего газа, истекающего из сопла, и f_n – газа, заполняющего канал до начала истечения струи. Использованное экспериментальное оборудование позволило установить вид типичного графика зависимости $P_d(P_0)$ донного давления от полного давления перед соплом, а также отыскать характерные давления $P_I - P_{IV}$ (рис. 3) в заданном диапазоне чисел Маха и полууглов конусности сопел.

Рассмотрим теперь подробнее наиболее сложное явление, возникающее в канале с внезапным расширением потока – **низко-**

частотные 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 [3–6] как экспериментально, так и с помощью разработанных математических моделей. Достаточно полный обзор экспериментальных исследований дан в статье [7]. Ниже приведено обобщение сведений о низкочастотных колебаниях в канале.

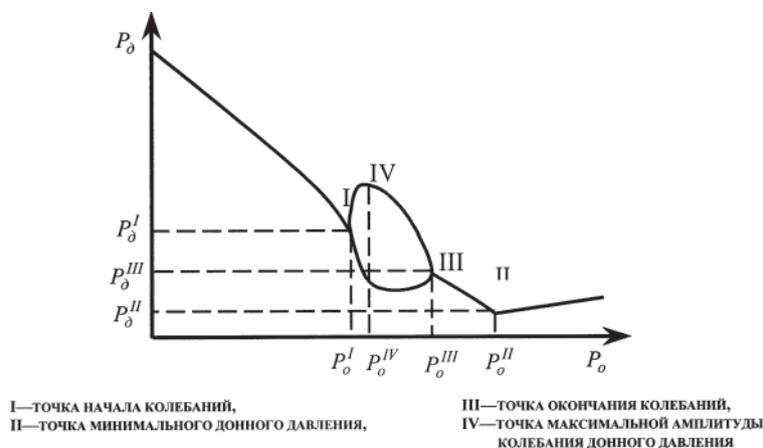


Рис. 3. Характерные давления на типичном графике зависимости $P_d(P_0)$

Экспериментально обнаружены три вида низкочастотных колебаний [8], следующих по мере изменения P_0 друг за другом. Эти виды колебаний отличаются формой колебательного цикла и механизмом поддержания. При увеличении P_0 сначала возникают составные колебания, когда колебательный цикл составлен из двух полуциклов: часть колебательного цикла происходит при открытой донной области, в которую попадает газ окружающей среды, а другая при закрытой. С повышением P_0 за ними всегда следуют псевдогармонические колебания, подобные осциллятору Ван-Дер-Поля. Колебания происходят между двумя крайними положениями, соответствующими натеканию струи на стенку турбулентным участком и первой бочкой. Донная область – закрытая. Наконец, при дальнейшем росте P_0 устанавливаются релаксационные колебания, амплитуда которых расположена не симметрично (смещена вверх) относительно осредненной (построенной без учета колебаний) кривой графика $P_d(P_0)$. Колебательный цикл имеет характерную пилообразную форму.

Низкочастотные колебания заканчиваются, как правило, вблизи точки графика, соответствующей минимальному донному давлению. Если в этот момент зафиксировать P_0 , то произойдет плавная перестройка ударно-волновой структуры струи и небольшое уменьшение P_d . Данный переходный процесс выражается в переходе точки натекания границы струи на стенку

из области турбулентного участка в область первой бочки.

Результаты теоретического исследования низкочастотных колебаний

Колебания и понятие дисбаланса расходов. Авторами была разработана полуэмпирическая модель течения, а также введено понятие [9] дисбаланса расходов масс $\zeta = (q_p - q_v)/Q_a$, поступающих в донную область (q_v) из окружающей среды или из области присоединения струи к стенке канала и эжектируемых из донной области струей (q_p), отнесенный к расходу рабочего газа через сопло Q_a . ζ является критериальной величиной, характеризующей состояние газодинамической системы в канале в целом. Если при заданном P_0 дисбаланс ζ равен нулю, то система находится в стационарном положении, в противном случае донное давление изменяется во времени. Изучение поведения газодинамической системы в пространстве переменных $\zeta - P_d$ аналогично исследованию ее динамических свойств на фазовой плоскости. Было установлено, что при натекании струи на стенку канала газодинамическим или турбулентным участком функция дисбаланса $\zeta(P_d)$ при $P_0 = \text{const}$ в пределах своей области определения (ООФ) может быть немонотонной и иметь 2 корня, один из которых устойчивый, а другой – нет (рис. 4). Устойчивому корню соответствует экспериментальное значение донного давления (показано на рис. 4 сплошной линией на нижней плоскости $P_0 - P_d$).

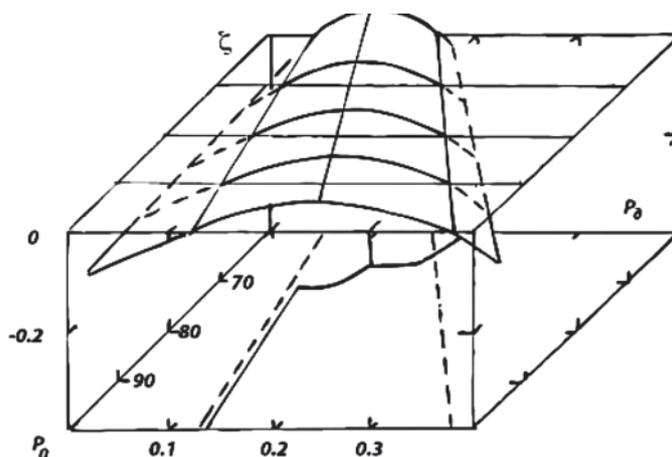


Рис. 4. Зависимость дисбаланса ζ от P_d и P_0

Если в ООФ функция $\zeta(P_d)$ не имеет корней, то при данном P_0 струя в канале не может находиться в стационарном положении. Существует такое сочетание геометрии сопла и канала, а также величины полного давления в ресивере перед соплом,

что функция дисбаланса $\zeta(P_d)$ при $P_0 = \text{const}$ в пределах своей области определения (ООФ) имеет только один корень. Колебания в таких системах не возникают.

Концепция дисбаланса расходов позволила не только построить полную класси-

фикацию режимов течения в канале с внезапным расширением [10], но и исследовать зарождение и окончание колебаний, процесс перестройки колебательных циклов.

Численное исследование колебаний донного давления. Основой всех двухпараметрических моделей турбулентности, использующих осреднение уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу, является гипотеза Буссинеска [11] о турбулентной (вихревой) вязкости. В сложных течениях, например, с большой кривизной линии тока или с отрывом и присоединением пограничных слоев, гипотеза не применима. Сверхзвуковые отрывные течения с донными областями как раз и относятся к такого рода случаям. Кроме того, непосредственно использовать данные модели турбулентности для расчета

сверхзвуковых течений на нестационарных режимах нельзя, т.к. при их выводе используется осреднение параметров течения по времени. Однако низкочастотные колебания донного давления относятся к классу квазистационарных, т.е. таких, период которых существенно больше характерного времени протекающих газодинамических процессов. Это позволяет проводить по крайней мере исследование качественных характеристик колебательных режимов. Методика постановки вычислительного эксперимента подробно описана в статье [12].

Интересным результатом, полученным в ходе вычислительного эксперимента, является выявленный механизм перехода от составных колебаний к псевдогармоническим (рис. 5).

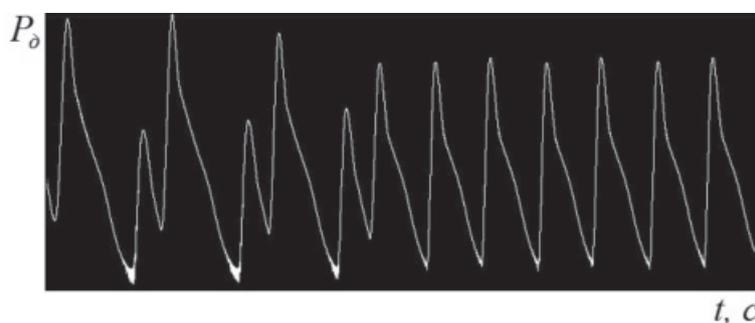


Рис. 5. Переход от составных колебаний к псевдогармоническим колебаниям.

$$P_0 = 50 \text{ атм}, M_a = 2, l_{mp} = 342 \text{ мм}$$

В ходе ранних экспериментальных исследований было выявлено, что при переходе от составных колебаний к псевдогармоническим меняется не только форма колебательного цикла, но иногда удваивается частота.

Сначала в колебаниях появляется новая мода, отражающая трансформации ударно-волновой структуры струи и перемещения центрального скачка уплотнения, затем постепенно уменьшается до нуля пик $P_{д'}$, соответствующий открытой донной области (рис. 5 в левой части графика). При дальнейшем увеличении P_0 две моды колебаний в случае коротких каналов сливаются, а в средних и длинных полностью разделяются. При этом происходит удвоение частоты колебаний.

За псевдогармоническими следуют релаксационные колебания, имеющие характерную пилообразную форму цикла. При больших числах M_a струи имеют длинную первую бочку, а линии тока – небольшую кривизну. В результате в момент касания первой бочкой стенок канала вторая за-

стойная зона, образующаяся между сечением, соответствующим максимальному диаметру первой бочки струи, и областью натекания турбулентного участка на стенку канала, оказывается существенно длиннее, чем у струй с меньшим M_a , а ее объем сопоставим с объемом донной области. Колебания происходят в небольшом диапазоне изменения $P_{д'}$ и заключаются в возникновении и исчезновении второй застойной зоны.

Выводы

Низкочастотные колебания струи в канале с донной областью имеют период много больше характерного времени протекания турбулентных процессов в слое смешения. Это позволяет с определенными оговорками применять для их исследования численные методы, основанные на дифференциальных моделях турбулентности. Вычислительный эксперимент позволил подтвердить основные выводы о природе и механизме колебаний, сделанные ранее на основе экспериментальных исследований. Для выявления тонкой структуры

колебательных циклов необходимо применение прямого численного моделирования или как минимум методов, построенных по типу моделирования крупных вихрей.

Список литературы

1. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О классификации режимов течения в канале с внезапным расширением // Теплофизика и Аэромеханика. – 2012. – № 2. – С. 209–222.
2. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. История экспериментальных исследований донного давления // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12 (часть 3). – С. 670–674.
3. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Колебания донного давления // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3. – С. 204–207.
4. Булат П.В., Засухин О.Н., Продан Н.В. Особенности применения моделей турбулентности при расчете течений в сверхзвуковых трактах перспективных воздушно-реактивных двигателей // Двигатель. – 2012. – № 1. – С. 20–23.
5. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Газодинамика и акустика сверхзвуковых струй, истекающих в канал с внезапным расширением // Современные проблемы неравновесной газодинамики. – БГТУ, 2002. – С. 136–158.
6. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О дополнении классификации режимов течения с внезапным расширением и природе случайных колебаний струи в канале // Тезисы докладов XX Международного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям. – СПб.: ИПЦ СПбГУТД, 2004. – С. 37.
7. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. Турбулентные отрывные течения. – М.: Наука, 1979. – 368 с.
8. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
9. Anderson J.S., Jungowski W.M., Hiller W.J., Meier G.E.A. Flow oscillation in a duct with a rectangular cross-section // of Fluid Mechanics. – 1977. – 79, Pt 4. – P. 769–784.
10. Anderson J.S., Jungowski W.M., Hiller W.J., Veier G.E.A. Strömungsswingungen in 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. 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.
12. Jungowski W.M. On the pressure oscillating in a sudden enlargement of a duct section // Fluid Dynamics Transaction. – 1967. – № 1. – P. 735–741.

References

1. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Uskov V.N. O klassifikacii rezhimov techenija v kanale s vnezapnym rasshireniem. *Teplofizika i Aeromehanika*. no. 2. 2012. pp. 209–222.

2. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V. Istoriya jeksperimental'nyh issledovanij donnogo davlenija. *Fundamental'nye issledovanija*, no. 12 (chast' 3), 2011, pp. 670–674.

3. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V. Kolebanija donnogo davlenija. *Fundamental'nye issledovanija*, no. 3, 2012, pp. 204–207.

4. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Prodan N.V. Osobennosti primeneniya modelej turbulentnosti pri raschete techenij v sverhzvukovyh traktah perspektivnyh vozdušno-reaktivnyh dvigatelej. *Dvigatel'*. no. 1, 2012. pp. 20–23.

5. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Uskov V.N. Gazodinamika i akustika sverhzvukovyh struj, istekajushhih v kanal s vnezapnym rasshireniem. // *Sovremennye problemy neravno-vesnoj gazodinamiki*. BGTU. 2002. pp. 136–158.

6. Bulat P.V., Zasuhin O.N., Uskov V.N. O dopolnenii klassifikacii rezhimov techenija s vnezapnym rasshireniem i prirode sluchajnyh kolebanij strui v kanale. *Tezisy докладов XX Mezhduнародного семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям*, SPb.: IPC SPbGUTD, 2004. p. 37.

7. Gogish L.V., Stepanov G.Ju. *Turbulentnye otrivnye techenija*. M.: Nauka, 1979. 368 p.

8. Snegirjov A.Ju. *Vysokoproizvoditel'nye vychislenija v tehničeskoj fizike*. Chislennoe modelirovanie turbulentnyh techenij: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2009. 143 p.

9. Anderson J.S., Jungowski W.M., Hiller W.J., Meier G.E.A. Flow oscillation in a duct with a rectangular cross-section // of Fluid Mechanics. –1977. 79, Pt 4. pp. 769–784.

10. Anderson J.S., Jungowski W.M., Hiller W.J., Veier G.E.A. Strömungsswingungen in Grabitz G. Model calculations of selfexcited oscillations in transonic flow in a duct with an abrupt enlargement. *Lect. Notes Phys.* 1979. no. 90. pp. 268–273.

11. 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. no. 3. pp. 79.

12. Jungowski W.M. On the pressure oscillating in a sudden enlargement of a duct section // *Fluid Dynamics Transaction*. 1967. no. 1. pp. 735–741.

Рецензенты:

Баранов И.В., д.т.н., профессор, заместитель директора Института холода и биотехнологий, ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург;

Пеленко В.В., д.т.н., профессор, заместитель директора по учебной работе Института холода и биотехнологий, ФГБОУ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 14.02.2013.