

Численное исследование автоколебательных течений в каналах вращения с цилиндрическими телами на оси*

В. И. Пинчуков

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

Контактный e-mail: pinchvi@ict.nsc.ru

Работа посвящена поиску новых автоколебательных течений и их численному изучению. Эти поиски проводились путем расчетных исследований течений с максимальным количеством контактных разрывов и точек пересечения разрывов — ударных волн с ударными волнами или ударных волн с контактными разрывами.

Рассмотрены два класса течений: натекание звуковой недорасширенной струи на цилиндрическое тело, расположенное в открытой трубе, и взаимодействие сверхзвукового однородного потока с системой открытой канал вращения (с переменным сечением) — цилиндрическое тело на оси. В обоих случаях найдены автоколебательные режимы. Двумерные осесимметричные уравнения сжимаемого газа решены с помощью неявной схемы Рунге — Кутты третьего порядка. Применяется алгебраическая турбулентная вязкость, основанная на использовании обобщенной формулы Кармана.

Ключевые слова: автоколебательные течения, уравнения сжимаемого газа, методы высокого разрешения, неявные схемы Рунге — Кутты.

Библиографическая ссылка: Пинчуков В.И. Численное исследование автоколебательных течений в каналах вращения с цилиндрическими телами на оси // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 4. С. 108–117.

DOI: 10.25743/ICT.2019.24.4.007.

Введение

Поиск новых автоколебательных течений проводится в настоящей работе на основе предположения о том, что автоколебания появляются в результате резонансных взаимодействий “активных” элементов течения, а именно элементов, усиливающих возмущения [1]. Используется предположение, что список “активных” элементов включает контактные разрывы и точки пересечения ударных волн или контактных разрывов с ударными волнами. Усиление возмущений контактными разрывами является результатом неустойчивости Кельвина — Гельмгольца и общепринято. Включение точек пересечения в список усилителей возмущений предложено в [1] как гипотеза, которая проверяется результатами поиска новых нестационарных течений.

Автоколебательные течения могут быть разделены на несколько классов:

- 1) течения, образующиеся при втекании струй в каверны [2–4];
- 2) течения, возникающие при падении струй на поверхности [1, 5–9];

*Title translation and abstract in English can be found on page 117.

© ИВТ СО РАН, 2019.

- 3) течения возле каверн, открытых набегающему однородному потоку [10–12];
- 4) течения в кавернах при касательном внешнем потоке [13–16];
- 5) течения возле затупленных тел с выступающими носовыми элементами [1, 17–19];
- 6) течения возле тел с торцевыми оконечностями, генерирующими сход нестационарных вихревых структур [20–22];
- 7) трансзвуковые течения возле крыловых профилей (в этом случае уравнения Эйлера могут иметь неединственное решение, что порождает бифуркации и автоколебания) [23, 24].

Численное исследование течений, содержащих наибольшее количество активных элементов, используется для поиска новых автоколебательных течений в работах [25–27]. В частности, найдены нестационарные течения возле затупленных тел (цилиндров или конусов), испускающих струю навстречу потоку [25–27]. Представляется, что эти течения не могут быть включены в какой-либо приведенный выше класс нестационарных течений. Обнаружено, что натекание звуковой недорасширенной струи на систему открытая труба — цилиндрическое тело на оси [27] может иметь автоколебательные режимы. По-видимому, эти течения могут быть включены во второе семейство (см. выше) нестационарных течений.

Исследования течений возле системы открытая труба — тело на оси продолжились в данной работе. Рассматривались также сверхзвуковые течения возле системы аналогичной конфигурации, включающей открытый канал вращения и цилиндрическое тело на оси, но набегающий поток является однородным, в отличие от предыдущего случая, кроме того, канал является профилированным. Обнаружено, что если набегающий однородный поток имеет числа Маха в диапазоне $3 \leq M_\infty \leq 4.5$, существуют геометрические параметры, при которых реализуются автоколебательные режимы течения.

Следует отметить, на твердых стенках используется условие непротекания, т. е. условие, соответствующее уравнениям Эйлера. Однако опыт численных исследований нестационарных течений на основе схемы Рунге—Кутты третьего порядка [28] показал, что при использовании уравнений Эйлера возможно получение нестационарных режимов для течений, близких к автоколебательным, но, по-видимому, ими не являющихся. Поэтому используется алгебраическая модель турбулентности, сконструированная в [25–27] на базе обобщенной формулы Кармана для пространственного масштаба турбулентных пульсаций. Таким образом, решаются уравнения Рейнольдса, но с граничными условиями на твердых поверхностях, соответствующими применению уравнений Эйлера, т. е. пограничные слои не учитываются и учет турбулентной вязкости сказывается в основном на моделировании контактных разрывов. Это снижает требования к модели турбулентности и позволяет использовать простую и универсальную модель [25–27]. Следует отметить, что для установления типа решаемых уравнений должны быть рассмотрены старшие производные от искомым функций. Если турбулентная вязкость зависит от производных решения, тип уравнений Рейнольдса может стать отличным от параболического типа уравнений Навье—Стокса. Чтобы избежать этого негативного эффекта, в модели Кармана [25–27] используется процедура усреднения.

1. Тестовая задача о падении ударной волны на клин

Чтобы проиллюстрировать свойства численной схемы при использовании модели Кармана турбулентной вязкости, применяется ставший уже классическим динамический

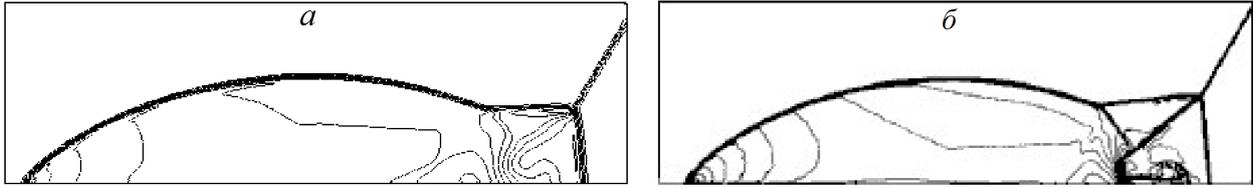


Рис. 1. Изолинии плотности: *a* — в настоящей работе, сетка 361×121 ; *b* — в работе [28]

тест о падении ударной волны с числом Маха $M = 10$ на клин с углом полураствора 30° . Показатель адиабаты равен $\gamma = 1.4$. Как и в [28], используется сетка 361×121 .

На рис. 1 приведены изолинии, полученные в настоящей работе и в [28]. При сравнении результатов надо учитывать, что расчет [28] выполнен с применением *TVD*-алгоритмов, соответственно, он демонстрирует более высокий уровень разрешения особенностей течения. Применяемый здесь неявный метод [29] ориентирован на цели разделения стационарных и нестационарных решений и поэтому не использует *TVD*-слагаемые, которые сложно отобразить в стабилизирующих операторах. Вместо этого применяются диффузионные слагаемые, которые представлены и в стабилизирующих операторах схемы, но несколько смазывают детали потока. Однако в целом решение описывается этим методом правильно.

2. Алгоритм расчета течений в каналах с цилиндрическими телами на оси

2.1. Граничные условия

На рис. 2 схематически представлены расчетная область и разностная сетка возле цилиндрического тела, помещенного в открытом канале вращения. Все переменные заданы на наветренной границе (*HA*). Когда рассматривается струйное течение, на части этой границы задаются параметры струи: $M = M_{jet}$, $\rho = \rho_{jet}$, $P = P_{jet}$, — плотность и давление, в безразмерной форме; $v_{jet} = 0$ — радиальная компонента скорости. На оставшейся части границы (*HA*) задаются атмосферные параметры: $M = 0$;

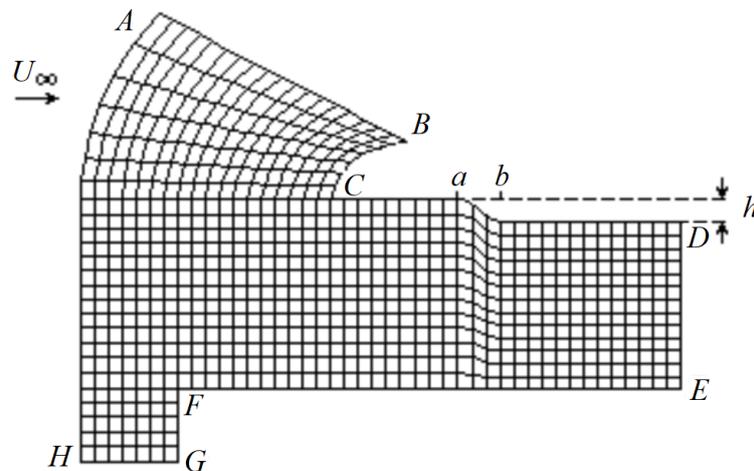


Рис. 2. Схематическое представление расчетной области и разностной сетки

$\rho = 1$ — плотность и $P = 1$ — давление, в безразмерной форме; $v = 0$. При исследовании взаимодействий однородного потока с представленной конфигурацией используются условия $M = M_\infty$, $\rho = 1$, $P = 1$, $v = 0$. На всех остальных границах условия одинаковы для двух рассматриваемых здесь проблем. На границах (CB , CD , FE , FG), соответствующих твердым поверхностям, нормальная компонента скорости полагается равной нулю, остальные переменные экстраполируются. На оси симметрии HG радиальная компонента скорости полагается равной нулю, остальные переменные экстраполируются. Экстраполяционные соотношения используются также на границах DE и AB , соответствующих истечению газа из области исследования. Экстраполяционные соотношения имеют вид $f_I = (1 + c)f_{I-1} - cf_{I-2}$, где I — номер граничного узла; c — константа, которая имеет значение 0.3 для границы, совпадающей с осью симметрии, $c = 0.8$ для выходных сверхзвуковых границ и границ, совпадающих с твердой поверхностью, в остальных случаях $c = 0$.

Профиль канала на участке $[a, b]$ с редукцией площади поперечного сечения описывается формулой

$$y(x) = \frac{R - 16h(x - a)^2(x - 2b + a)^2}{(b - a)^4}.$$

2.2. Численный метод

На основе неявной схемы Рунге — Кутты [29] создана версия [25, 27] основной программы, предназначенная для использования при исследовании течений возле тел сложной геометрической конфигурации. Рассмотрен случай, когда достаточно гладкие функции $x = x(a, b)$, $y = y(a, b)$ осуществляют отображение единичного квадрата на плоскости переменных a, b с вырезами $\{0 \leq a \leq a_1, 0 \leq b \leq b_1\}$, $\{a_2 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq b_2\}$ на криволинейный четырехугольник с криволинейными четырехугольными вырезами (рис. 2). Эта версия позволяет проводить вычисления, описываемые ниже, без разделения сложной расчетной области на подобласти. Как исходный метод [29], так и его модифицированная версия имеют третий порядок (вязкие слагаемые аппроксимируются со вторым порядком). Используется сетка 515×586 .

Естественно, в численных расчетах применяются безразмерные величины. В качестве обезразмеривающих параметров для плотности используется плотность невозмущенного потока ρ_∞ , для давления — P_∞ , для скорости — $\sqrt{P_\infty/\rho_\infty}$, для пространственных переменных максимальный внутренний радиус канала тел r_{tub} , для времени — $r_{tub}/\sqrt{P_\infty/\rho_\infty}$.

3. Результаты расчетов

3.1. Натекание струи на расположенный в канале цилиндр

Характеристикой осцилляций в какой-либо точке может служить среднеквадратическое отклонение плотности $\Delta\rho$ от среднего значения:

$$\Delta\rho = \sqrt{\overline{\rho'^2}}, \quad \overline{\rho'^2} = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} (\rho^n - \bar{\rho})^2}{N}, \quad \bar{\rho} = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} \rho^n}{N},$$

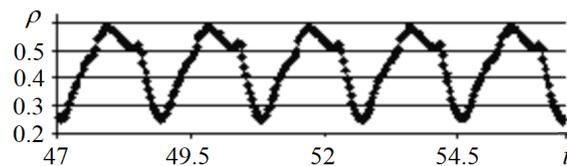
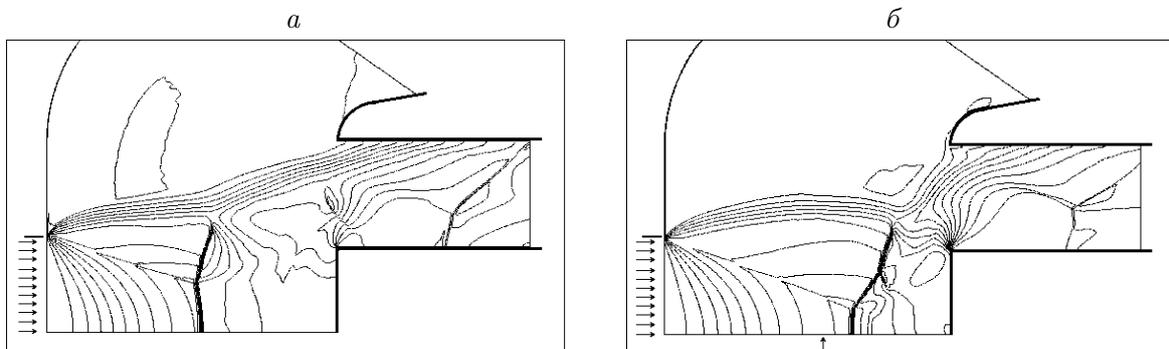
где N — число временных уровней, по которым вычисляется величина $\Delta\rho$.

Т а б л и ц а 1. Интенсивности автоколебаний при натекании струи на систему цилиндр—труба

№ варианта	L_{tub}	P_{jet}	r_{jet}	r_{cyl}	$\Delta\rho(C)$	$\Delta\rho(F)$
1	1.0	1.6	0.5	0.45	0.0548	0.0190
2	1.0	1.8	0.5	0.45	0.0637	0.0438
3	1.1	1.6	0.5	0.055	0.0635	0.0471
4	1.1	1.6	0.5	0.5	0.0585	0.0292
5	1.1	1.6	0.5	0.6	0.0611	0.0506
6	1.2	1.6	0.5	0.45	0.0612	0.0206
7	1.2	1.6	0.5	0.65	0.0613	0.0515
8	1.3	1.6	0.5	0.55	0.0648	0.0361

В предпоследнем и последнем столбцах табл. 1 приведены значения среднеквадратического отклонения плотности для разных течений в точках C и F (рис. 2) соответственно. Для всех вариантов температура в начальном сечении струи принята равной $T_{jet} = 0.8$, расстояние этого сечения от цилиндра $d_{jet} = 1.5$ (оба параметра даны в безразмерной форме). Параметр h , задающий сужение трубы, в этом случае равен нулю.

На рис. 3 изображена динамика плотности для течения, в котором температура и давление в начальном сечении струи приняты равными $T_{jet} = 0.8$ и $P_{jet} = 1.8$ (обезразмерены делением на температуру и давление невозмущенной среды). Геометрические параметры приняты равными $r_{cyl} = 0.45$ (радиус цилиндра), $r_{jet} = 0.5$ (начальный радиус струи), $h_{jet} = 1.5$ (расстояние начального сечения струи от цилиндра), $L_{tub} = 1.0$, $L_{cyl} = 1.0$ (L_{jet} и L_{cyl} — длина трубы и цилиндра). Этот вариант помещен в таблице под номером 2. На графике приведены значения плотности в окрестности кромки цилиндра. Виден периодический характер осцилляций, период равен 2.07.

Рис. 3. Динамика плотности, $P_{jet} = 1.8$ Рис. 4. Изолинии плотности, $t = 57.0$ (а) и $t = 57.0 + T/2$ (б)

Для иллюстрации характера колебаний на рис. 4, *a* приведены изолинии плотности в моменты времени, разделенные половиной этого периода. Границы трубы и цилиндра обозначены жирной линией. На рис. 4, *b* стрелкой внизу отмечено положение ударной волны в предыдущий момент времени, изображенный на рис. 4, *a*. Можно видеть значительные колебания положения ударной волны, образованной в результате торможения струи.

3.2. Взаимодействие сверхзвукового потока с системой цилиндр — труба

Поиск нестационарных течений проводился здесь при разных числах Маха с шагом 0.5. Для каждого числа Маха выполнялись пробные расчеты при различных геометрических параметрах. Оказалось, что если сужение канала отсутствует, только стационарные течения обнаруживаются в расчетах. Автоколебательные режимы найдены в тех случаях, когда соотношение длин канала и цилиндра таково, что ударная волна, порожденная торможением потока на торце цилиндра, приходит к кромке канала (обозначена символом *C* на рис. 2). Поиск заканчивался, когда были найдены один–три нестационарных варианта. Ниже приводятся примеры нестационарных течений при разных числах Маха.

В табл. 2 в последнем столбце приведены значения среднеквадратического отклонения плотности для разных течений. Среднеквадратические отклонения рассчитывались в точке *C* (см. рис. 2). Во всех вариантах радиус цилиндра принят равным $R_{cyl} = 0.3$, длина канала $L_{tub} = 0.9$ (оба параметра даны в безразмерной форме). Используется сетка 515×586 .

На рис. 5 представлена динамика плотности для течения, определенного геометрическими параметрами: длина цилиндра $L_{cyl} = 1.4$, радиус цилиндра $R_{cyl} = 0.3$, длина

Т а б л и ц а 2. Интенсивности автоколебаний при натекании однородного потока на систему цилиндр — труба

№ варианта	M_∞	h	L_{cyl}	$\Delta\rho(C)$
1	3.0	0.09	1.4	0.251
1	3.0	0.07	1.5	0.179
2	3.5	0.06	1.5	0.770
3	3.5	0.08	1.5	0.853
4	4.0	0.04	1.6	1.051
5	4.0	0.07	1.5	1.017
6	4.5	0.06	1.6	1.502
7	4.5	0.07	1.5	1.239

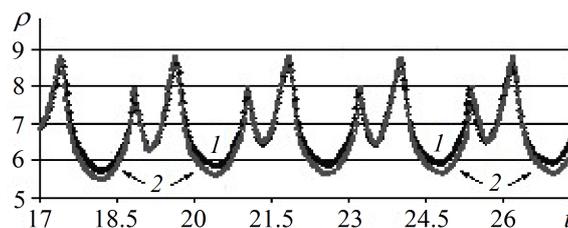


Рис. 5. Динамика плотности, $M_\infty = 3.5$; 1 — для сетки 515×586 , 2 — 715×786

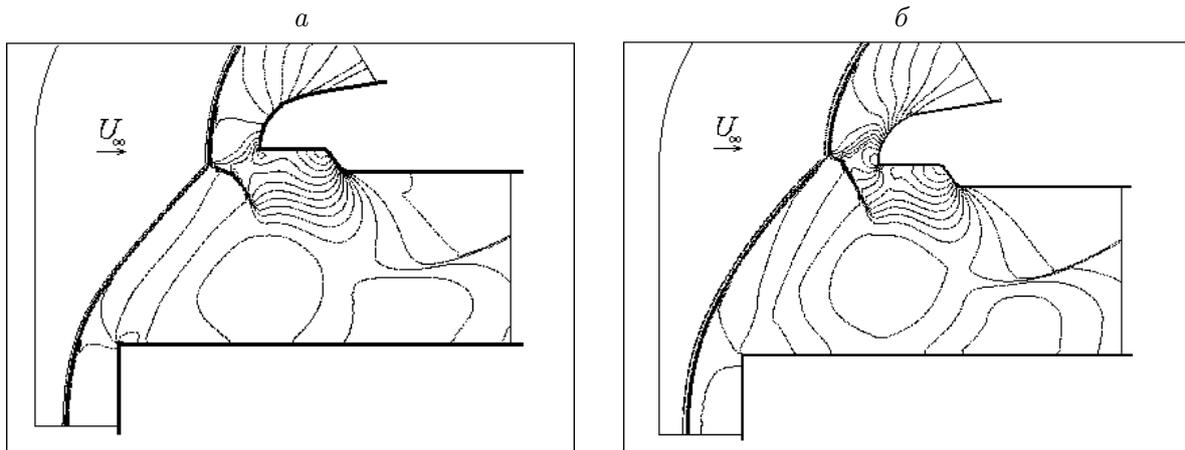


Рис. 6. Изолинии плотности: $t = 27.4 + T/8$ (а) и $t = 27.4 + 5T/8$ (б)

канала $L_{tub} = 0.9$, наименьший радиус канала $R_{min} = R_{max} - h = 1 - h = 0.92$, $h = 0.08$, $a = x(F) + 0.25L_{cyl}$, $b = a + 0.1$ (см. рис. 3). Этот вариант соответствует номеру 3 в табл. 2. Значения плотности брались в точке, обозначенной символом C на рис. 2. Этот вариант дополнительно исследован численно на сетке с увеличенным количеством узлов, а именно, вместо сетки 515×586 использована сетка 715×786 . В момент времени $t = 14$ произведена интерполяция численного решения с сетки 515×586 на более мелкую и решение просчитано до финального момента $t = 27.4$. На графике плотности 5 видно, что это течение почти периодическое с периодом $T = 2.19$. В расчетах обнаружено, что при увеличении числа Маха имеет место уменьшение периода автоколебаний.

Для иллюстрации характера колебаний на рис. 6 приведены изолинии плотности в моменты времени, разделенные половиной этого периода. Границы трубы и цилиндра обозначены жирной линией. Сравнивая рис. 6, а и б, можно видеть, что они отличаются только расположением точки пересечения скачков, т. е. автоколебания локализованы возле зоны движения этой точки, т. е. возле кромки цилиндра (точка C на рис. 3). Аналогичная картина имеет место для всех автоколебательных течений, обнаруженных и исследуемых в данной работе.

Заключение

Настоящая работа посвящена поиску автоколебательных течений посредством исследования течений с максимальным количеством “активных” элементов течения, а именно контактных разрывов и точек пересечения разрывов — ударных волн с ударными волнами или ударных волн с контактными разрывами. Рассмотрены два семейства нестационарных течений в каналах вращения с цилиндрическими телами на оси. Первое семейство образуется при втекании в каналы звуковых недорасширенных струй. Представляется, что эти течения могут быть включены во второй класс (см. введение) нестационарных течений — течений, возникающих при падении струй на поверхности.

Еще один класс исследованных течений образуется при взаимодействии однородных сверхзвуковых потоков с системой цилиндр — канал. В расчетах обнаружены автоколебательные режимы для чисел Маха набегающего потока в диапазоне $3 \leq M_\infty \leq 4.5$. На первый взгляд их можно отнести к третьему классу течений, к тем, которые возникают при натекании однородных потоков на открытые полости, обращенные навстречу

этим потокам. Однако структура течений в данном случае более схожа с течениями пятого класса, которые возникают при обтекании затупленных тел с выступающими вперед элементами. Здесь внутренний цилиндр играет роль выступающего элемента, в частности, генерируя ударную волну, в месте падения которой на торец цилиндра возникают автоколебания. Но механизм автоколебаний в данном случае более сложен, так как в порождении пульсаций играет роль дополнительный фактор — наличие сужения канала, без которого автоколебательные режимы не обнаружены.

Список литературы / References

- [1] **Пинчуков В.И.** Численное моделирование нестационарных течений с переходными режимами // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 2009. Т. 49, № 10. С. 1765–1783.
Pinchukov, V.I. Numerical modeling of non-stationary flows with transient regimes // Comput. Mathematics and Math. Physics. 2009. Vol. 49, No. 10. P. 1844–1852.
- [2] **Hartmann, J.** On a new method for the generation of sound waves // Physical Rev. 1922. Vol. 20(6). P. 719–726.
- [3] **Murugappan, S., Gutmark, E.** Parametric study the Hartmann–Sprenger tube // Experiments in Fluids. 2005. Vol. 38(6). P. 813–823.
- [4] **Kastner, J., Samimy, M.** Development and characterization of Hartmann tube fluid actuators for high-speed control // AIAA J. 2002. Vol. 40(10). P. 1926–1934.
- [5] **Wu, W., Piomelli, U.** Large-eddy simulation of impinging jets with embedded azimuthal vortices // J. of Turbulence. 2014. Vol. 16(10). P. 44–66.
- [6] **Kuo, C.-Y., Dowling, A.P.** Oscillations of a moderately underexpanded choked jet impinging upon a flat plate // J. of Fluid Mech. 1996. Vol. 315. P. 267–291.
- [7] **Sakakibara, Y., Iwamoto, J.** Numerical study of oscillation mechanism in under-expanded jet impinging on plate // J. of Fluids Eng. 1998. Vol. 120. P. 477–481.
- [8] **Горшков Г.Ф., Усков В.Н.** Особенности автоколебаний, возникающих при обтекании ограниченной преграды сверхзвуковой недорасширенной струей // Прикл. механика и техн. физика. 1999. Т. 40, № 4. С. 143–149.
Gorshkov, G.F., Uskov, V.N. Specialties of self-oscillations, arising from interaction of supersonic underexpanded jet with finite obstacle // Prikl. Mekhanika i Tekhn. Fizika. 1999. Vol. 40, No. 4. P. 143–149. (In Russ.)
- [9] **Henderson, B., Bridges, J., Wernet, M.** An experimental study of the oscillatory flow structure of tone-producing supersonic impinging jets // J. of Fluid Mech. 2005. Vol. 542. P. 115–137.
- [10] **Ladon, D.W., Schneider, S.P., Schmisser, J.D.** Physics of resonance in a supersonic forward-facing cavity // J. of Spacecraft and Rockets. 1998. Vol. 35(5). P. 626–632.
- [11] **Engblom, W.A., Yuceil, B., Goldstein, D.B., Dolling, D.S.** Experimental and numerical study of hypersonic forward-facing cavity flow // J. of Spacecraft and Rockets. 1996. Vol. 33(3). P. 353–359.
- [12] **Yuceil, K.B., Dolling, D.S.** Nose cavity effects on blunt body pressure and temperatures at Mach 5 // J. of Thermophys. and Heat Transfer. 1995. Vol. 9(4). P. 612–619.
- [13] **Rossiter, J.** Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds. British Aeronautical Research Council Reports and Memoranda No. 3438, 1964. Available at: <https://repository.tudelft.nl/view/aereports/uuid:a38f3704-18d9-4ac8-a204-14ae03d84d8c>

- [14] **Rowley, C., Colonus, T., Basu, A.** On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities // *J. of Fluid Mechanics*. 2002. Vol. 455, No. 2. P. 315–346.
- [15] **Tam, C.-J., Orkwis, P.D., Disimile, P.J.** Algebraic turbulence model simulations of supersonic open-cavity flow physics // *AIAA J.* 1996. Vol. 34, No. 11. P. 2255–2260.
- [16] **Murray, N., Sallstrom, E., Ukeiley, L.** Properties of subsonic open cavity flow fields // *Phys. of Fluids*. 2009. Vol. 21. P. 095103-16.
- [17] **Gauer, M., Paull, A.** Numerical investigation of a spiked nose cone at supersonic speeds // *J. of Spacecraft and Rockets*. 2008. Vol. 45(3). P. 459–471.
- [18] **Caarese, W., Hankey, W.L.** Modes of shock wave oscillations on spike tipped bodies // *AIAA J.* 1985. Vol. 23(2). P. 185–192.
- [19] **Mehta, R.C.** Pressure oscillations over a spiked blunt body at hypersonic Mach number // *Comput. Fluid Dynamics J.* 2008. Vol. 9(2). P. 88–95.
- [20] **Natarajan, R., Acrivos, A.** The instability of the steady flow past spheres and disks // *J. of Fluid Mechanics*. 1993. Vol. 254. P. 323–344.
- [21] **Berger, E., Scholz, D., Schumm, M.** Coherent vortex structures in the Wake of a sphere and a circular disk at rest and under forced vibrations // *J. of Fluids and Structures*. 1990. Vol. 4. P. 231–257.
- [22] **Sakamoto, H., Haniu, H.** The formation mechanism and shedding frequency of vortices from a sphere in uniform shear flow // *J. of Fluid Mechanics*. 1995. Vol. 287. P. 151–171.
- [23] **Jameson, A.** Airfoils admitting non-unique solutions of the Euler equations // *AIAA Paper*. 1991. No. 91-1625. P. 1–13.
- [24] **Hafez, M., Guo, W.H.** Some anomalies of numerical simulation of shock waves. Pt 1. Inviscid flows // *Comput. and Fluids*. 1999. Vol. 28(4/5). P. 701–719.
- [25] **Пинчуков В.И.** Моделирование автоколебаний и поиск новых автоколебательных течений // *Матем. моделирование*. 2011. Т. 23, № 8. С. 97–109.
Pinchukov, V.I. Modeling of self-oscillations and a search for new self-oscillatory flows // *Math. Models and Comput. Simulations*. 2012. Vol. 4, No. 2. P. 170–178.
- [26] **Pinchukov, V.I.** Self-oscillatory flows near blunted bodies, giving off opposite jets: CFD study // *Intern. J. of Eng. and Innovat. Technology*. 2016. Vol. 6(5). P. 41–46.
- [27] **Pinchukov, V.I.** Sonic underexpanded jet impinging on the pair open tube-inner cylinder // *Intern. J. of Modern Trends in Eng. and Res.* 2017. Vol. 4(11). P. 8–14.
- [28] **Woodward, P., Collela, P.** The numerical simulation of two-dimensional fluid flow with strong shocks // *J. of Comput. Physics*. 1984. Vol. 54. P. 115–173.
- [29] **Пинчуков В.И.** Численное решение уравнений вязкого газа неявной схемой Рунге—Кутты третьего порядка аппроксимации // *Журн. вычисл. математики и матем. физики*. 2002. Т. 42(6). С. 898–907.
Pinchukov, V.I. Numerical solution of the equations of viscous gas by an implicit third order Runge-Kutta scheme // *J. of Comput. Mathematics and Math. Physics*. 2002. Vol. 42(6). P. 898–907. (In Russ.)

*Поступила в редакцию 6 июня 2018 г.,
с доработки — 15 апреля 2019 г.*

Numerical investigation of self-oscillatory flows in the rotation channels with cylindrical bodies on the axis

PINCHUKOV, VLADIMIR I.

Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

Corresponding author: Pinchukov, Vladimir I., e-mail: pinchvi@ict.nsc.ru

This paper addresses a search for new self-oscillatory compressible flows and numerical studies of these flows. These searches are carried out by computational modelling of currents with the maximum number of contact discontinuities and points of intersection of discontinuities — shock waves with shock waves or shock waves with contact discontinuities. Two families of unsteady flows are considered. The first one contains flows near underextended sonic jets, impinging on cylindrical bodies placed in open tubes. The second family corresponds to interactions of uniform supersonic streams with pairs containing the open channel of rotation (with transient cross-section) and a cylindrical body on the axis. Self-oscillatory regimes are found in both cases. Two-dimensional axisymmetrical compressible flow equations are solved by an implicit Runge—Kutta scheme of the third order. Algebraic turbulent viscosity is assumed which is based on the implementation of the generalized Karman formulae.

Numerical results allow concluding that unsteady flows, which take place when sonic jets impinge on a pair containing of cylinders and open tubes are typical for jets impinging on obstacles. Flows, which take place when uniform streams interact with these pairs comprise a new original class of self-oscillatory flows.

Keywords: self-oscillations, Euler equations, high resolution methods, implicit Runge—Kutta schemes.

Cite: Pinchukov, V.I. Numerical investigations of self-oscillatory flows in channels of rotation with cylindrical bodies at axis // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 4. P. 108–117. (In Russ.) DOI: 10.25743/ICT.2019.24.4.007.

Received 6 Juny 2018

Received in revised form 15 April 2019