

УДК 534.8

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА РАБОТУ ГЕНЕРАТОРА ГАРТМАНА С СОПЛОМ С БОЛЬШОЙ СТЕПЕНЬЮ РАСШИРЕНИЯ

Ю.-С. Цзюн, Ч.-Ц. Ким*, Ч.-Ю. Юнь

Политехнический университет им. Ким Чхэка, Пхеньян, КНДР

* Университет им. Ким Ир Сена, Пхеньян, КНДР

E-mails: 15124579382@163.com, 13674610562@163.com, 15124580637@163.com

С использованием модели турбулентности выполнено численное моделирование влияния емкости резонатора Гельмгольца на работу генератора Гартмана при большом значении отношения давления в сопле к давлению на выходе из него. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. В результате численного моделирования установлено, что при использовании резонатора Гельмгольца частота колебаний генератора Гартмана и амплитуда его колебаний меньше, чем при использовании резонатора в виде прямолинейной трубы. Изолинии числа Маха и ячеистая структура ударных волн в области между соплом и резонатором практически одинаковы как в случае резонатора Гельмгольца, так и в случае резонатора в виде прямолинейной трубы, однако возвратное течение для резонаторов этих двух типов различное. Основная частота колебаний существенно зависит от диаметра задней камеры резонатора Гельмгольца.

Ключевые слова: генератор Гартмана, низкая частота, численное моделирование, резонатор Гельмгольца.

DOI: 10.15372/PMTF20190602

Введение. Простота конструкции генератора Гартмана, в котором отсутствуют движущиеся детали и который может возбуждать колебания давления большой амплитуды, обуславливает широкое использование его в различных устройствах, в частности в пылесборниках и для ускорения химических реакций [1].

Колебания давления большой амплитуды возбуждаются при взаимодействии высокоскоростной струи, истекающей из сопла, со столбом воздуха, содержащегося в полости, расположенной на некотором расстоянии от сопла. Экспериментально установлено, что в зависимости от отношения давления в сопле к давлению на выходе из него и расстояния между соплом и резонатором генератор Гартмана может работать в трех режимах: режиме неустойчивости струи, режиме возвратного течения и режиме визга (screech mode) [2]. При работе генератора Гартмана в режиме резонанса возникают ударные волны, имеющие периодическую ячеистую структуру. При небольшом отношении давления в сопле к давлению на выходе из него структура ударных волн ромбовидная, а при большом — бочкообразная. Экспериментально установлено, что при больших отношениях давления в сопле к давлению на выходе из него генератор Гартмана работает в режиме резонанса [3]. Для исследования механизма возникновения звука при работе генератора Гартмана

применяются численные методы гидродинамики. В работах [4, 5] влияние геометрии резонатора на характеристики неустановившегося течения при работе генератора Гартмана изучалось с использованием пакета WIND. В [6] проведено сравнение результатов численного моделирования работы экранированного генератора Гартмана с экспериментальными данными. В [7] представлены результаты численного моделирования с использованием неструктурированного кода GEMS работы генератора Гартмана с направляющим насадком при наличии иглы в случае, когда число Маха равно $M_j = 2$. Обратно пропорциональная зависимость резонансной частоты от длины трубы резонатора ограничивает область применения генератора Гартмана в устройствах, возбуждающих колебания низкой частоты. Например, для удаления золы из конвекционных теплообменников котлов необходимы низкочастотные колебания в интервале от 300 до 600 Гц. Поскольку при использовании резонатора Гельмгольца низкочастотный диапазон работы генератора Гартмана может быть увеличен без значительного увеличения длины трубы резонатора, в ряде работ предложено использовать его в качестве четвертьволнового резонатора [8, 9]. В [9] с использованием аналитических методов исследована работа генератора Гартмана и установлено, что колебания низкой частоты возбуждаются в том случае, если длина горловины резонатора и длина его задней камеры одинаковы. В [10, 11] изучалась работа генератора Гельмгольца при различных значениях отношения давления в сопле к давлению на выходе из него и установлено, что при малых значениях этого отношения результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В данной работе исследуется влияние емкости резонатора Гельмгольца на характеристики течения и структуру ударных волн, возбуждаемых генератором Гартмана, при больших значениях отношения давления в сопле к давлению на выходе из него.

1. Постановка задачи. При анализе влияния наличия резонатора Гельмгольца на течение струи, исходящей из генератора Гартмана, используются геометрические параметры резонатора в виде прямолинейной трубы, описанного в [12]. Диаметр исходящей струи равен 7 мм, расстояние между выходным сечением сопла и горловиной резонатора — 20 мм. Диаметр впускного отверстия горловины резонатора равен диаметру впускного отверстия сопла, общая длина резонатора (включая длину горловины и длину задней камеры) составляет 30 мм. При моделировании в качестве рабочего газа рассматривается идеальный газ, отношение давления в сопле к давлению на выходе из него равно пяти. В соответствии с параметрами экспериментального оборудования [12] внешний и внутренний диаметры горловины приняты равными 11 и 7 мм соответственно.

Геометрия резонатора и расчетная область приведены на рис. 1 (D_j — диаметр струи, м; D_n — диаметр горловины, м; D_c — диаметр задней камеры, м; L_n — длина горловины, м; L_c — длина задней камеры, м; S — расстояние между соплом и резонатором, м).

2. Результаты моделирования и их обсуждение. При описании структуры течения и ударных волн размеры расчетной области в осевом и радиальном направлениях были приняты равными $20D_j$ и $10D_j$ соответственно. Расчетная сетка построена с использованием программного пакета GAMBIT. Для уменьшения времени вычислений расчетная область представлялась в виде объединения множества подобластей. На границе области ставились условия непротекания, значения безразмерной координаты y^+ внутри пристенного пограничного слоя изменялись в интервале от 0 до 100.

Вычисления выполнялись на сетках с различным числом узлов: $11,4 \cdot 10^4$, $17,1 \cdot 10^4$ и $25,6 \cdot 10^4$. При дальнейшем измельчении сетки распределение статического давления вдоль продольной оси r практически не менялось. Моделирование выполнено с использованием пакета Ansys 15.0 и модели турбулентности Спаларта — Аллмараса [13]. Вычисленное значение основной частоты (1893 Гц) отличается от ее экспериментального значения (1978 Гц) [12] не более чем на 4,6 %.

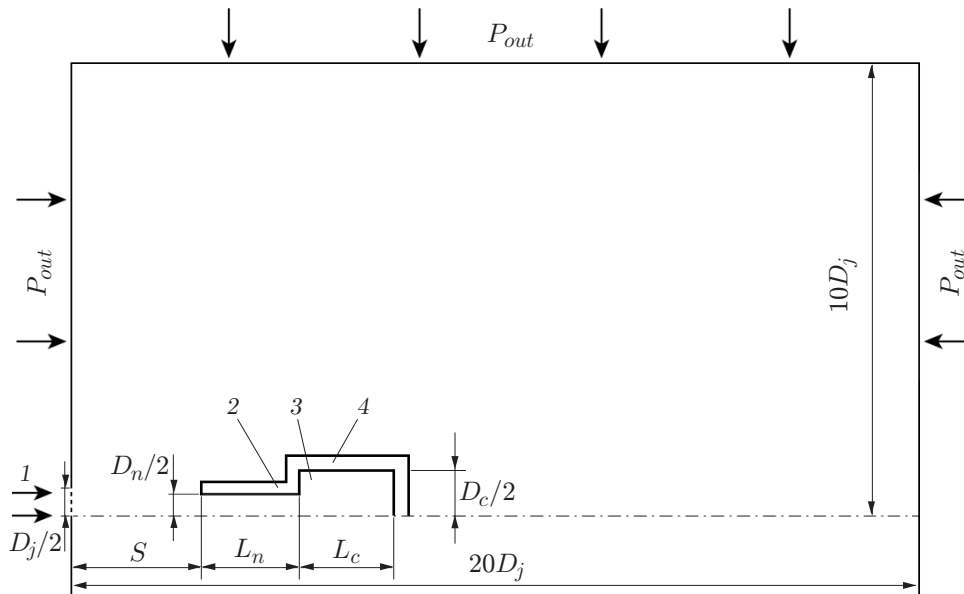


Рис. 1. Геометрия резонатора и расчетная область:

1 — струя, 2 — горловина, 3 — резонатор Гельмгольца, 4 — задняя камера

2.1. Сравнение характеристик течения, иницированного генератором Гартмана, при наличии резонатора Гельмгольца и в его отсутствие. Изолинии числа Маха M_j , линии тока и структура течения при наличии резонатора в виде прямолинейной трубы (случай 1) и резонатора Гельмгольца (случай 2) представлены на рис. 2. Диаметр задней камеры резонатора равен 14 мм, длина горловины и длина задней камеры резонатора Гельмгольца составляют 15 мм. Таким образом, общая длина резонатора Гельмгольца равна длине резонатора, представляющего собой прямолинейную трубу.

Изолинии числа Маха и линии тока на рис. 2 приведены для четырех моментов времени, принадлежащих одному периоду колебаний.

Как в случае резонатора в виде прямолинейной трубы, так и в случае резонатора Гельмгольца ячеистая структура ударных волн практически одинакова на всем периоде колебаний (см. рис. 2, а, б).

На рис. 2, в, г приведены линии тока и изолинии осевой компоненты вектора скорости V_a для резонатора двух типов. В обоих случаях при $t = t_0$ начинается фаза заполнения резонатора. В случае 2 в верхнем углу на границе между горловиной и задней камерой образуется вихрь небольшой интенсивности. В случае 1 линии тока параллельны оси симметрии. Со временем интенсивность заполнения увеличивается и достигает максимального значения при $t = t_0 + (1/4)T$. В случае 2 интенсивность вихря, сформировавшегося на оси симметрии вблизи входа в горловину, увеличивается. Этот вихрь прижимает поток к стенкам горловины. К моменту времени $t = t_0 + (2/4)T$ интенсивность вихря, сформировавшегося на оси симметрии вблизи входа в горловину, уменьшается, фаза заполнения заканчивается и начинается фаза опустошения резонатора. В дальнейшем выходящий поток равномерно распределяется по горловине, интенсивность опустошения достигает максимума, а затем уменьшается, в результате фаза опустошения заканчивается. Таким образом, завершается период колебаний.

В обоих рассмотренных случаях изолинии числа Маха и ячеистая структура ударных волн практически одинаковы, но структура течения существенно различается. В случае резонатора Гельмгольца образуются вихри и усиливаются эффекты нелинейности.

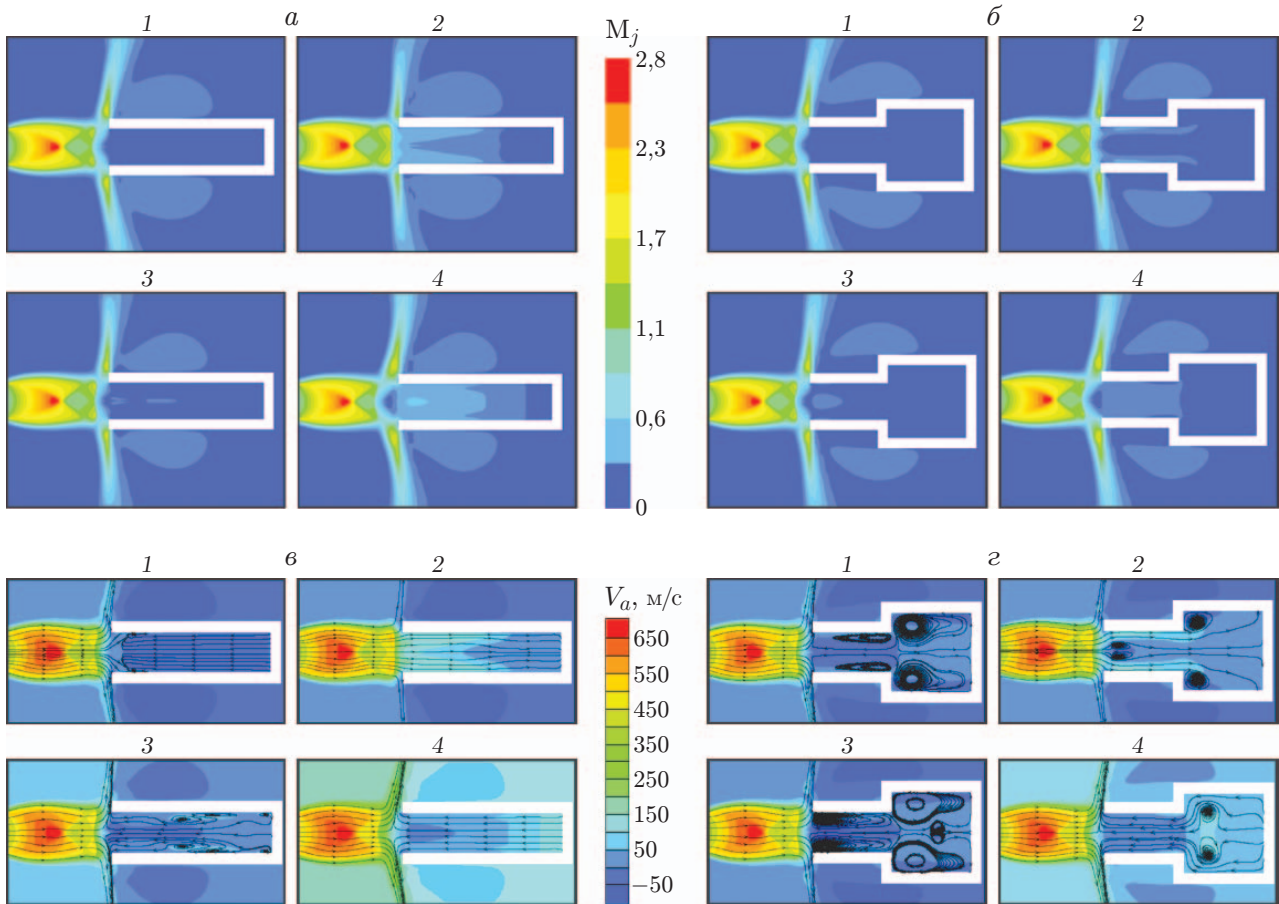


Рис. 2. Изолинии числа Маха (*а, б*), линии тока и изолинии осевой компоненты вектора скорости (*в, г*):

а, в — резонатор в виде прямолинейной трубы, *б, г* — резонатор Гельмгольца; 1 — $t = t_0$, 2 — $t = t_0 + (1/4)T$, 3 — $t = t_0 + (2/4)T$, 4 — $t = t_0 + (3/4)T$

На рис. 3 приведены зависимости массового расхода газа Q во входном сечении камеры от времени для резонатора двух типов. В обоих случаях зависимости имеют форму синусоиды и колебания происходят в окрестности значения массового расхода $Q = 0$. Это означает, что фаза заполнения камеры и фаза ее опустошения периодически меняются. (В случае резонатора Гельмгольца в течении, инициированном генератором Гартмана, имеются области возвратного течения.) В случае резонатора Гельмгольца массовый расход меньше, чем в случае резонатора в форме прямолинейной трубы. Основная частота колебаний резонатора Гельмгольца (1165 Гц) существенно меньше основной частоты колебаний резонатора в виде прямолинейной трубы (1893 Гц).

2.2. *Влияние емкости резонатора Гельмгольца на процесс колебаний.* Проведены исследования структуры течения газа из генератора Гартмана при наличии резонаторов Гельмгольца с задними камерами различного диаметра (10, 14 и 21 мм) и при наличии резонатора в виде прямолинейной трубы. Длина горловины и длина задней камеры не менялись и составляли 15 мм. Отношение давления в сопле к давлению на выходе из него равно пяти. Вычисления продолжались до момента появления периодических колебаний.

На рис. 4 приведена зависимость основной частоты колебаний резонатора Ω от диаметра задней камеры D_c . При увеличении диаметра задней камеры в три раза (с 7 до 21 мм) основная частота колебаний уменьшается в 0,45 раза. При увеличении диаметра

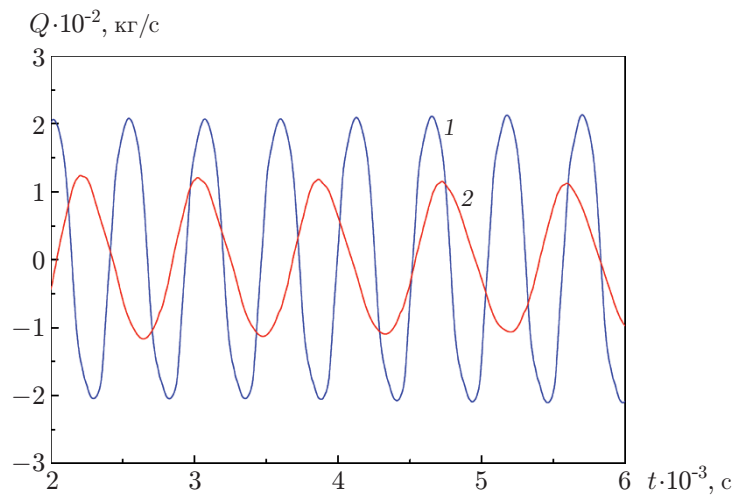


Рис. 3. Зависимости массового расхода газа во входном сечении камеры от времени:

1 — резонатор в виде прямолинейной трубы, 2 — резонатор Гельмгольца при $D_c/D_n = 2$

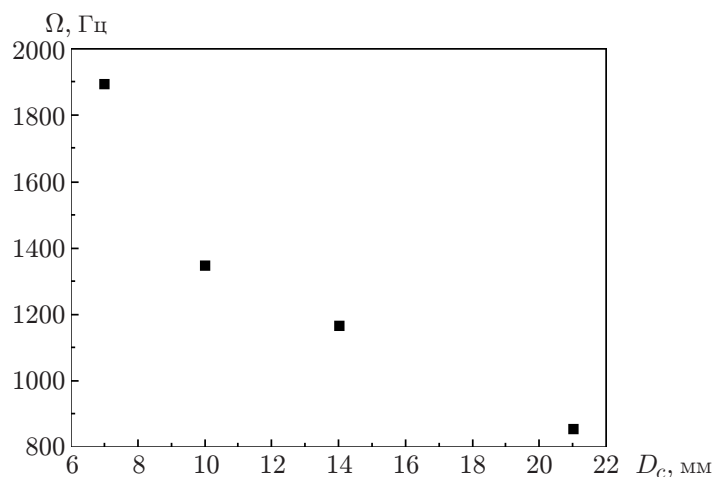


Рис. 4. Зависимость основной частоты от диаметра задней камеры

задней камеры (т. е. при увеличении емкости резонатора) основная частота колебаний уменьшается по нелинейному закону. Этот вывод не соответствует выводу из результатов анализа, приведенных в работе [10], что может быть обусловлено большим значением отношения давления в сопле к давлению на выходе из него.

На рис. 5 приведены зависимости статического давления P_0 в точке пересечения оси симметрии и задней стенки камеры от времени при различных значениях диаметра камеры в случае резонатора Гельмгольца и резонатора в виде прямолинейной трубы.

Амплитуда колебаний статического давления для резонатора в виде прямолинейной трубы равна 2,89 МПа. Это значение меньше значения, вычисленного по эмпирической формуле $\Delta P_{\max} = 2\gamma M_j P_0$ [14], в которой не учитывается вязкая диссипация. Амплитуда колебаний статического давления и его максимальное значение для резонатора Гельмгольца меньше, чем для резонатора в виде прямолинейной трубы, и с увеличением отношения D_c/D_n от 1,43 до 3,00 эти значения уменьшаются. Таким образом, статическое давление на оси симметрии на задней стенке камеры существенно зависит от ее диаметра.

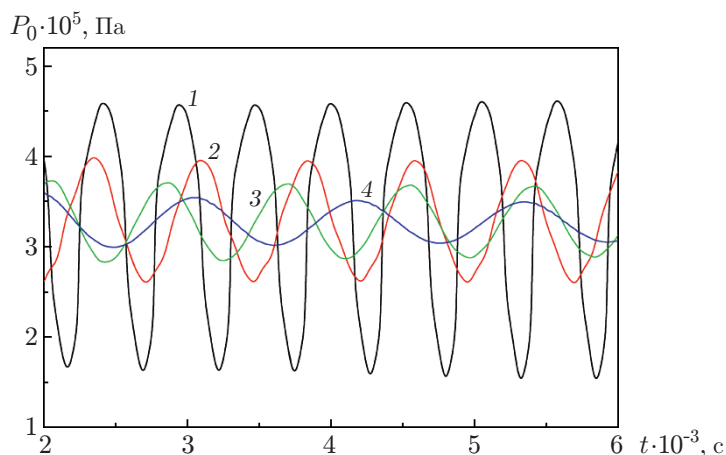


Рис. 5. Зависимость статического давления в точке пересечения оси симметрии и задней стенки камеры от времени при различных значениях диаметра камеры: 1 — резонатор в виде прямолинейной трубы ($D_c/D_n = 1$), 2–4 — резонатор Гельмгольца (2 — $D_c/D_n = 1,4$, 3 — $D_c/D_n = 2,0$, 4 — $D_c/D_n = 3,0$)

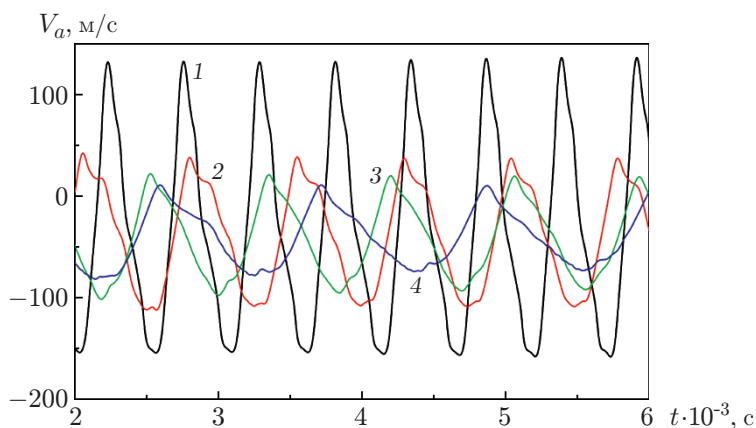


Рис. 6. Зависимость от времени осевой компоненты вектора скорости потока в точке, находящейся внутри горловины резонатора на расстоянии 25 мм от выхода из сопла, при различных значениях диаметра задней камеры резонатора (обозначения те же, что на рис. 5)

2.3. *Структура течения внутри полости резонатора.* На рис. 6 для различных значений отношения D_c/D_n представлены зависимости от времени осевой компоненты вектора скорости потока в точке, находящейся внутри горловины резонатора на расстоянии 25 мм от выхода из сопла. Из приведенных зависимостей следует, что структура течения потока внутри горловины существенно зависит от диаметра задней камеры резонатора. С увеличением диаметра задней камеры резонатора осевая компонента вектора скорости уменьшается. Если диаметр задней камеры равен 21 мм, скорость становится отрицательной, и в этом случае существует только обратное течение.

На рис. 7 для различных значений отношения D_c/D_n представлены зависимости от времени осевой компоненты вектора скорости потока в точке, находящейся внутри задней камеры резонатора на расстоянии 45 мм от выхода из сопла. При значениях диаметра задней камеры, равных 10 и 14 мм, зависимости осевой скорости от времени такие же, как и в случае резонатора в виде прямолинейной трубы (происходят синусоидальные колебания

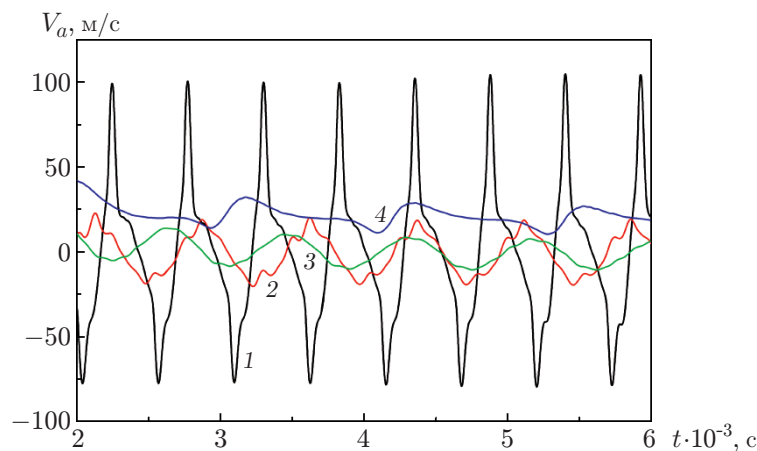


Рис. 7. Зависимость от времени осевой компоненты вектора скорости потока в точке, находящейся внутри задней камеры резонатора на расстоянии 45 мм от выхода из сопла, при различных значениях диаметра задней камеры (обозначения те же, что на рис. 5)

в окрестности значения $V_a = 0$). При диаметре задней камеры, равном 21 мм, имеет место только фаза заполнения, и величина осевой скорости изменяется периодически.

Заключение. Выполнено численное моделирование течения внутри резонатора Гельмгольца, возникающего при истечении струи из генератора Гартмана при больших значениях отношения давления внутри сопла к давлению на выходе из него.

Установлено, что наличие резонатора Гельмгольца практически не оказывает влияния на ячеистую структуру ударных волн, но существенно влияет на основную частоту собственных колебаний и структуру течения как внутри горловины резонатора, так и в его задней камере. В случае резонатора с диаметром задней камеры, равным 7 мм, основная частота составляет 1893 Гц. При увеличении диаметра задней камеры до значения, равного 21 мм, основная частота уменьшается до 856 Гц. Таким образом, можно получить низкочастотные колебания, не увеличивая существенно размер резонатора.

Несмотря на то что при больших значениях диаметра задней камеры собственные частоты резонатора невелики, применять в этом случае при моделировании течения одномерную волновую теорию при больших значениях отношения давления внутри сопла к давлению на выходе из него недопустимо вследствие наличия нелинейных эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Raman G., Srinivasan K.** The powered resonance tube: from Hartmann's discovery to current active flow control applications // *Progr. Aerospace Sci.* 2009. V. 45. P. 97–123. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2009.05.001>.
2. **Sarohia V., Back H. L.** Experimental investigation of flow and heating in a resonance tube // *Fluid Mech.* 1979. V. 94, N 4. P. 649–672. DOI: 10.1017/S0022112079001233.
3. **Sarpotdar S., Raman G., Cain A. B.** Powered resonance tubes: resonance characteristics and actuation signal directivity // *Experiments Fluids.* 2005. V. 39, N 6. P. 1084–1095. DOI: 10.1007/s00348-005-0041-5.
4. **Hamed A., Das K., Basu D.** Numerical simulation of unsteady flow in resonance tube. S. l., 2002. (Paper / AIAA; N 2002-1118). DOI: 10.2514/6.2002-1118.

5. **Hamed A., Das K., Basu D.** Numerical simulation and parametric study of Hartmann — Sprenger tube based powered device. S. l., 2003. (Paper / AIAA; N 2003-0550). DOI: 10.2514/6.2003-550.
6. **Murugappan S., Gutmark E.** Parametric study of the Hartmann — Sprenger tube // Experiments Fluids. 2005. V. 38, N 6. P. 813–823. DOI: 10.1007/s00348-005-0977-5.
7. **Xia G. P., Li D., Merkle C. L.** Effects of a needle on shrouded Hartmann — Sprenger tube flows // AIAA J. 2007. V. 45, N 5. P. 1028–1035. DOI: 10.2514/1.18591.
8. **Sobieraj G. B., Szumowski A. P.** Experimental investigations of an under-expanded jet from a convergent nozzle impinging on a cavity // Sound Vibrat. 1991. V. 149, N 3. P. 375–396. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90443-N](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90443-N).
9. **Nelson C. C., Cain A. B., Kerschen E. J., Raman G.** Simulations of Helmholtz resonator powered resonance tubes at moderate pressure ratios // Tech. papers of the 44th AIAA Aerospace sciences meeting and exhibit, Reno (USA), 9–12 Jan. 2006. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.2514/6.2006-800>.
10. **Kerschen E. J., Cain A. B.** Analytical modeling of Helmholtz resonator based powered resonance tubes. S. l., 2004. (Paper / AIAA; N 2004-2691). DOI: 10.2514/6.2004-2691.
11. **Cain A. B., Kerschen E. J., Tassy J. M., Raman G.** Simulation of powered resonance tubes: Helmholtz resonator geometries // Tech. papers of the 2nd AIAA flow control conf., Portland (USA), 28 June — 1 July 2004. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.2514/6.2004-2690>.
12. **Narayanan S.** Spectra and directivity of a Hartmann whistle // J. Sound Vibrat. 2009. V. 321. P. 875–892. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.10.023>.
13. **Spalart P. R., Allmaras S. R.** A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. S. l., 1992. (Paper / AIAA; N 92-0439). DOI: 10.2514/6.1992-439.
14. **Brocher E., Duport E.** Resonance tubes in a subsonic flow field // AIAA J. 1988. V. 26, N 5. P. 548–552. DOI: 10.2514/3.9932.

*Поступила в редакцию 24/IV 2019 г.,
после доработки — 27/V 2019 г.
Принята к публикации 27/V 2019 г.*
