

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА ИЗ ЕМКОСТИ ЧЕРЕЗ КАНАЛ В СРЕДУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ ПРИ ПОДВОДЕ ТЕПЛА И МАССЫ

Приведены результаты численных исследований влияния одновременного подвода тепла и дополнительной массы газа на истечение газа из емкости, в которой заданы давление и температура, через канал в среду с заданным противодействием. На основе решения квазиодномерных уравнений газовой динамики показана возможность возникновения нестационарного автоколебательного режима такого истечения при стационарных условиях в ресивере и в выходном сечении канала. Выявлены характерные особенности течения. В частности, показано, что подвод массы приводит к уменьшению значений подводимых тепловых потоков, при которых имеет место переход от стационарного истечения к автоколебательному. Повышение энтальпии подводимой массы позволяет инициировать автоколебания без подвода тепла. При этом автоколебания реализуются в некотором достаточно узком диапазоне расходов дополнительно подводимого газа.

Наведено результати чисельних досліджень впливу одночасного підведення тепла й додаткової маси газу на витікання газу з ємності, у якій заданий тиск і температура, через канал у середовище із заданим протидією. На основі розв'язку квазиоднорічних рівнянь газової динаміки показано можливість виникнення нестационарного автоколивального режиму такого витікання при стаціонарних умовах у ресивері й у вихідному перетині каналу. З'ясовано характерні риси течії. Зокрема, показано, що підведення маси приводить до зменшення значень теплових потоків, що підводяться, при яких має місце перехід від стаціонарного витікання до автоколивального. Підвищення ентальпії маси, що підводиться, дозволяє ініціювати автоколивання без підведення тепла. При цьому автоколивання реалізуються в деякому досить вузькому діапазоні витрат газу, що підводиться додатково.

Results of numerical studies in the influence of a simultaneous input of heat and an additional gas mass on a gas discharge from the reservoir, in which the pressure and the temperature are given, through channel in medium with a given back pressure, are presented. Based on solution of quasi-one-dimensional equations of gas dynamics, a possibility of medium a non-stationary self oscillating mode of such discharge under stationary conditions in a receiver and a channel outlet section is demonstrated. In particular, it is shown that a mass supply results in reduction of values of supplied heat flows at which transfer from a stationary discharge to self-oscillating one is involved. Increase in enthalpy of a supplied mass initiates self-oscillations without the heat input. In so doing, self-oscillations are realized in some sufficiently narrow range of flow rates of an additionally supplied gas.

В работе [1] расчетным путем выявлена принципиальная возможность возникновения автоколебательных режимов истечения совершенного газа из емкости с заданными полным давлением p_0 и температурой T_0 или энтальпией i_0 в среду с заданным давлением p_∞ при распределенном по длине канала подводе тепла Δq . Показано, что подвод тепла в этих условиях приводит к уменьшению скорости во входном сечении. При $\Delta q/i_0 \rightarrow \infty$ коэффициент скорости λ_1 во входном сечении канала стремится к нулю, что приводит к парадоксу: при заданном конечном перепаде давлений в ресивере и окружающей среде прекращается истечение газа из ресивера. Этот парадокс разрешается перестройкой режима течения в канале, связанной с переходом от стационарного течения к нестационарному автоколебательному течению. Подвод массы при истечении газа в среду с заданным противодействием также приводит к уменьшению скорости во входном сечении канала и тем самым создает предпосылки для возникновения автоколебаний при подводе тепловой энергии к потоку при меньших интенсивностях теплоподвода. В настоящей работе изучается возможность возникновения автоколебаний в канале, обусловленная одновременным подводом тепла и дополнительной массы газа. Предполагается, что вдоль канала осуществляется подвод тепла и дополнительной массы газа с постоянной интенсивностью.

© В.И. Тимошенко, В.П. Галинский, 2009

Постановка задачи. Рассматривается истечение газа из емкости (ресивера) через канал постоянного поперечного сечения в окружающую среду. Считаются заданными параметры торможения потока в ресивере: p_0 – давление, T_0 – температура, и относительный перепад давлений в ресивере и окружающей среде $\Delta p = (p_0 - p_\infty)/p_0$.

Дифференциальные уравнения квазиодномерного течения в канале при подводе тепла и массы через боковую поверхность канала имеют вид [2, 3]

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = m,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = m \cdot u_w - \tau_w, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \rho u \left(i + \frac{u^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)} (\delta q + m \cdot i_w),$$

где u , ρ , p – скорость, плотность и давление газа, отнесенные к a_* , ρ_0 и $\rho_0 a_*^2$, соответственно; e , i – отнесенные к a_*^2 удельная энергия и статическая энтальпия, τ_w – напряжение трения на стенке канала, отнесенное к $\rho_0 a_*^2 S / (\chi L)$; u_w – продольная составляющая скорости дополнительно подводимого газа; i_w – энтальпия дополнительно подводимого газа, отнесенная к i_0 ; m и δq – отнесенные к $\rho_0 a_*$ и $\rho_0 a_* i_0$ количества массы и тепла, подведенные через единицу длины канала; a_* – критическая скорость звука, посчитанная по температуре в ресивере; ρ_0 – плотность газа в ресивере; γ – показатель адиабаты газа; $\tau = t \cdot a_* / L$ – безразмерное время; L – длина канала; χ – периметр поперечного сечения канала; S – площадь поперечного сечения канала.

При вводе массы по нормали к поверхности $u_w = 0$. При этом пограничный слой оттесняется от поверхности, что приводит к уменьшению трения. В статье принято $\tau_w = 0$.

Уравнения (1) решаются численно с использованием конечно-разностной схемы Годунова [4]. Для проведения расчетов вводится равномерная счетная сетка, содержащая 100 ячеек. В качестве граничного условия во входном сечении канала задается условие изоэнтропического вытекания из ресивера или втекания в ресивер, при этом используются параметры заторможенного газа в ресивере: давление p_0 и энтальпия торможения i_0 , определяемая по температуре T_0 газа в ресивере. В выходном сечении трубы задается условие равенства давлений в этом сечении и в окружающем пространстве. Для удовлетворения граничных условий используются характеристические соотношения и значения параметров на границах счетной области. При дозвуковом изоэнтропическом вытекании газа из ресивера в канал используется одно характеристическое соотношение, а также энтропия и энтальпия торможения в

ресивере; при дозвуковом вытекании из канала в ресивер используются два характеристических соотношения и давление торможения в ресивере [1, 3].

Безразмерными параметрами, определяющими решение задачи, являются: Δp , δq , m .

Режимы течения в канале при подводе массы и тепла. Параметрические исследования возможности появления нестационарных автоколебательных режимов истечения газа вследствие одновременного подвода тепла и массы проводятся при фиксированных значениях противодавления $\Delta p = 0,2$ и $i_w = 1$, т.е. энтальпия дополнительно подводимого газа совпадает с энтальпией торможения газа в ресивере.

Изменения коэффициента скорости λ_1 во входном сечении канала в зависимости от параметров m и δq приведены на рис. 1, где линия 1 соответствует значению $\delta q = 0$ или $m = 0$; линия 2 – $\delta q = 0,8$ или $m = 0,05$; линия 3 – $\delta q = 1,4$ или $m = 0,075$; линия 4 – $\delta q = 2,0$ или $m = 0,10$; линия 5 – $\delta q = 2,5$ или $m = 0,15$. Если при заданных значениях параметров δq и m возникают автоколебания, то используются осредненные по периоду значения коэффициента скорости λ_1 . Отрицательные значения коэффициента скорости λ_1 реализуются для режима вытекания газа как во внешнюю среду, так и в ресивер.

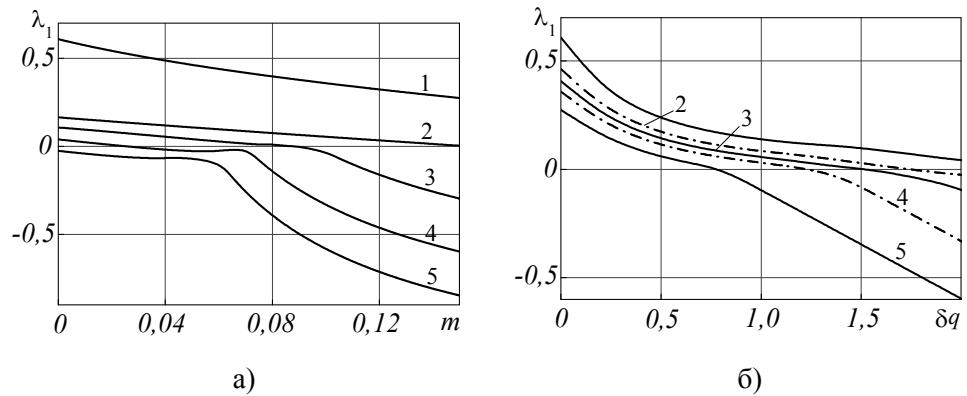


Рис. 1

Видно, что как подвод массы, так и подвод тепла приводят к уменьшению скорости во входном сечении. Одновременное действие этих двух факторов интенсифицирует уменьшение коэффициента скорости λ_1 . Следовательно, в соответствии [1] подвод массы должен создавать предпосылки к переходу к автоколебательному режиму течения при меньших интенсивностях теплоподвода.

В качестве иллюстрации автоколебательного режима течения на рис. 2 приведено изменение расхода газа во входном (а) и выходном (б) сечениях канала в зависимости от безразмерного времени τ при $\delta q = 1$ для различных интенсивностей распределенного по длине канала подвода массы.

Видно, что сначала амплитуда незначительна (кривая 1 – $m = 0,082$), затем она возрастает и достигает наибольшего значения (кривые 2 – $m = 0,085$; 3 – $m = 0,090$) и с дальнейшим увеличением m уменьшается и колебания прекращаются (кривые 4 – $m = 0,120$; 5 – $m = 0,126$), то есть зависимость ам-

плитуды автоколебаний от интенсивности подвода массы имеет немонотонный характер с наличием максимума при некотором значении m . При этом частота автоколебаний монотонно уменьшается с увеличением параметра m , а расходы во входном и выходном сечениях канала находятся в противофазе.

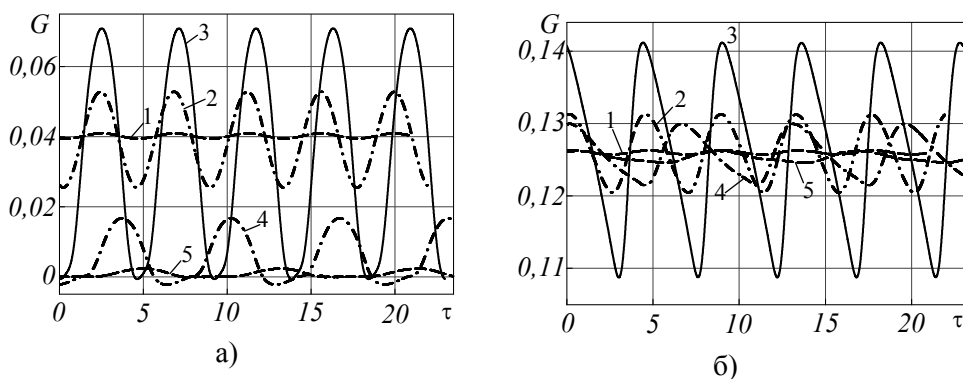


Рис. 2

Более детально особенности совместного влияния подвода массы и тепла на изменение расхода газа, вытекающего из емкости с заданным давлением и температурой в канал с заданным в выходном сечении давлением, иллюстрируются рис. 3 и 4.

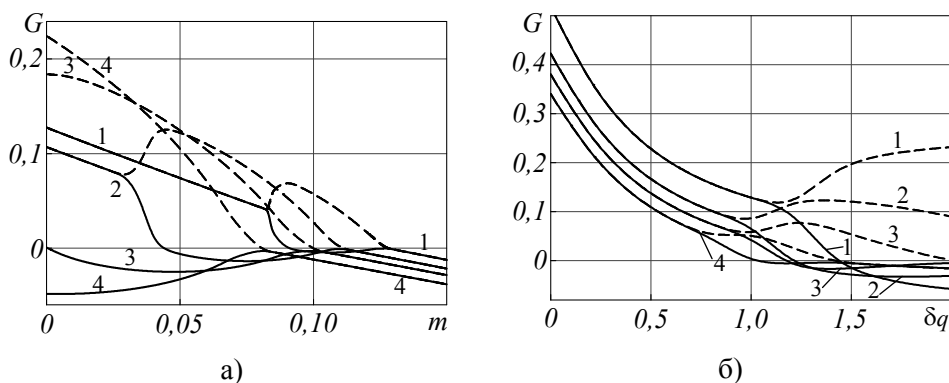


Рис. 3

На рис. 3 приведены изменения минимального G_{\min} (сплошные линии) и максимального G_{\max} (штриховые линии) расходов во входном сечении канала в зависимости от массы дополнительно подводимого газа m для $\delta q = 1,0; 1,2; 1,4$ и $1,8$ (линии 1, 2, 3 и 4 на рис. 3,а) и в зависимости от количества подводимого тепла δq для $m = 0; 0,05; 0,075$ и $0,10$ (линии 1, 2, 3 и 4 на рис. 3,б).

Расхождение линий G_{\min} и G_{\max} для одного и того же значения m или δq – это начало автоколебаний, а схождение – прекращение автоколебаний. Изменения частоты автоколебаний n в зависимости от параметров δq и m приведены на рис. 4, где использованы те же соответствия между значениями параметров и номерами линий.

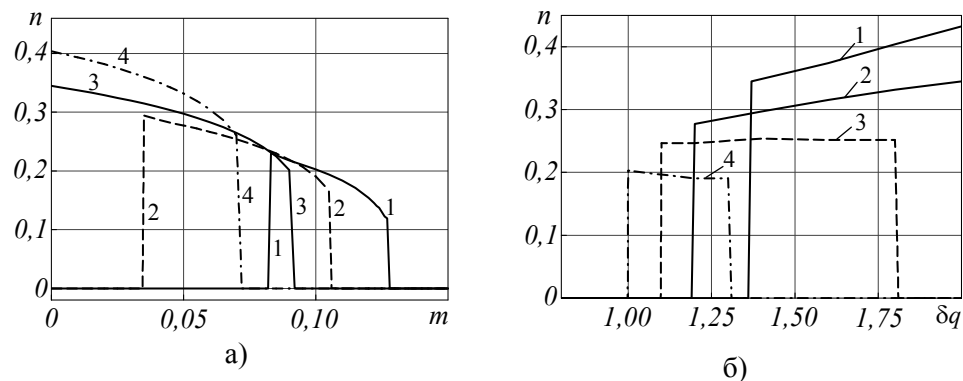


Рис. 4

Из рис. 3 и 4 следует, что общие закономерности совместного влияния распределенных по длине канала подводов тепла и дополнительной массы газа сводятся к следующему.

Без подвода массы ($m=0$) автоколебания возникают при $\delta q=1,36$. При увеличении δq амплитуда автоколебаний расхода $A = (G_{max} - G_{min}) / 2$ увеличивается, а период уменьшается.

Наличие распределенного по длине канала подвода массы приводит к двум аспектам. С одной стороны, вследствие подвода массы автоколебательный режим течения возникает при меньших тепловых потоках δq . Например, при $m=0,01$ колебания возникают для $\delta q=1,3$; при $m=0,03$ – для $\delta q=1,2$; при $m=0,085$ – для $\delta q=1,0$. С другой стороны, увеличение параметра m , начиная с некоторого его значения, приводит к уменьшению амплитуды колебаний. В условиях, когда распределенный подвод массы газа начинает приводить к втеканию газа из канала в ресивер, истечение из ресивера, а вместе с этим и автоколебания прекращаются. Причем, большим значениям δq соответствуют меньшие значения m , при которых прекращаются автоколебания: для $\delta q=1,0$ имеет место прекращение автоколебаний при $m=0,128$; для $\delta q=1,2$ – при $m=0,11$; для $\delta q=1,3$ – при $m=0,105$; для $\delta q=1,4$ – при $m=0,10$; для $\delta q=1,5$ – при $m=0,09$. В условиях перехода к стационарному течению, вызванному увеличением m , имеет место истечение из канала только части газа, подведенного через поверхность канала.

Влияние относительного перепада давления Δp на изменение минимального и максимального расходов во входном сечении канала (а) и частоты колебаний n (б) для параметра $\delta q=1,0$ при $\Delta p=0,1; 0,2$ и $0,3$ (кривые 1, 2 и 3) показано на рис. 5.

Амплитуда и частота колебаний уменьшаются с ростом перепада давлений Δp , с которым связано увеличение «жесткости» потока. При большем значении параметра Δp сложнее инициировать возникновение автоколебаний в потоке.

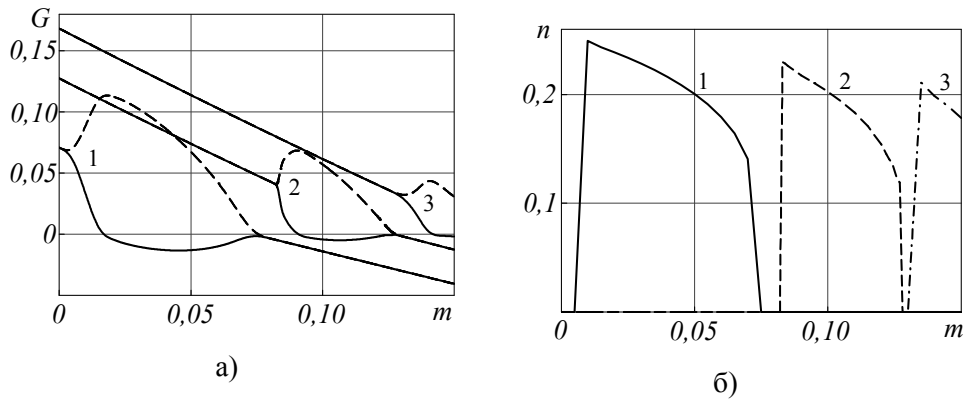


Рис. 5

Положение нижних (сплошные линии) и верхних (штриховые линии) границ областей автоколебаний в зависимости от параметров δq и m для относительных перепадов давления $\Delta p = 0,1; 0,2$ и $0,3$ (линии 1, 2 и 3) приведено на рис. 6.

Видно, что границы области автоколебаний сдвигаются в сторону больших значений параметров δq и m при увеличении относительного перепада давления Δp .

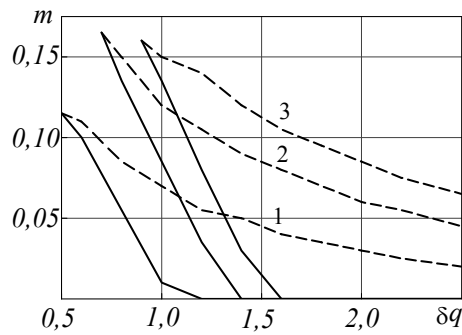


Рис. 6

Автоколебательные течения в канале при дополнительном подводе массы. Возможность возникновения нестационарных решений системы квазиодномерных уравнений газовой динамики при стационарных граничных условиях обуславливается правой частью уравнения энергии, которая является суммой подведенного тепла δq и энтальпии подведенной массы газа $m i_w$. Вследствие этого отсутствие подвода тепла ($\delta q = 0$) может быть скомпенсировано повышением энтальпии подводимого газа. Для иллюстрации этого ниже приведены результаты расчетов истечения газа из ресивера через канал в отсутствие теплоподвода при энтальпии вдуваемого газа $i_w = 1, 2, 5, 10, 20$ (линии 1, 2, 3, 4 и 5). Изменения минимального G_{\min} и максимального G_{\max} расходов во входном сечении канала в зависимости от массы дополнительно подводимого газа показаны на рис. 7.

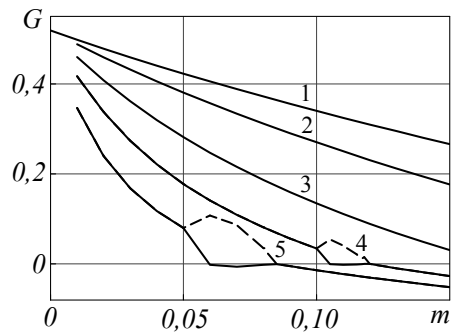


Рис. 7

Изменения частоты автоколебаний n в зависимости от параметра m для $i_w = 10$ (линия 1) и 20 (линия 2) показаны на рис. 8.

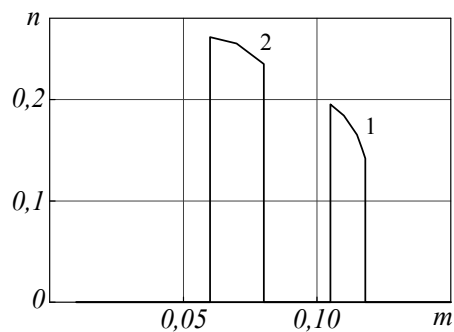


Рис. 8

Из рисунков видно, что расход газа, истекающего из ресивера в канал, уменьшается при увеличении энтальпии i_w вдуваемого газа. При $i_w < 10$ для всех рассмотренных значений интенсивности подвода массы m и при $m \geq 0,125$ для всех рассмотренных значений i_w реализуется стационарный режим течения в канале. При увеличении i_w амплитуда колебаний увеличивается и область значений m , при которых возникают колебания, сдвигается в сторону меньших расходов подводимого газа. Частота автоколебаний n увеличивается при увеличении i_w , а для заданного значения i_w уменьшается с ростом m .

Режим течения в канале для значений $i_w \geq 10$ зависит от параметра m следующим образом: $m < m_1$ – стационарный; $m_1 \leq m \leq m_2$ – автоколебательный; $m > m_2$ – стационарный. Значения m_1 и m_2 зависят от i_w : $m_1 = 0,10$, $m_2 = 0,12$ при $i_w = 10$; $m_1 = 0,05$, $m_2 = 0,085$ при $i_w = 20$.

Выводы. При истечении газа из емкости, в которой заданы давление и температура, через канал в среду, в которой задано давление, распределенный по длине канала подвод тепла может привести к возникновению автоколебательного, нестационарного режима истечения. Одновременный подвод тепла и газа позволяет сдвинуть область автоколебаний в сторону меньших

значений подводимых тепловых потоков. Область автоколебаний ограничена минимальным m_1 и максимальным m_2 расходами дополнительно подводимого газа при заданном подводе тепла. Величина m_2 характерна тем, что при $m > m_2$ имеет место втекание газа из канала в ресивер и истечение из ресивера прекращается. Диапазон значений m_1 и m_2 уменьшается при увеличении подводимого теплового потока.

Повышение энтальпии подводимого газа позволяет инициировать автоколебания без дополнительного подвода тепла. Период автоколебаний растет, а их амплитуда уменьшается при увеличении расхода дополнительно подводимого газа. Повышение энтальпии дополнительно подводимого газа сдвигает область автоколебаний в сторону меньших его расходов, при этом максимальные значения амплитуд колебаний параметров потока возрастают.

1. Тимошенко В. И. Истечение газа из емкости в среду с противодействием в условиях интенсивного подвода тепла / В. И. Тимошенко, В. П. Галинский // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 3. – С. 530 – 537.
2. Гинзбург И. П. Аэрогазодинамика / И. П. Гинзбург. – М. : Высшая школа, 1966. – 404 с.
3. Тимошенко В. И. Газовая динамика высокотемпературных технологических процессов / В. И. Тимошенко. – Днепропетровск : Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2003. – 460 с.
4. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Г. П. Прокопов. – М. : Наука, 1976. – 400 с.

Ин-т техн. механики НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 06.03.2009,
в окончательном варианте 16.03.2009