

вольтовы эквиваленты теплотеря для анода  $\Delta V_a$  и катода  $\Delta V_k$  в предположении, что экспериментальные величины тепловых потоков представляют собой сумму потока, обусловленного приэлектродными процессами, и конвективного потока. В рассматриваемых условиях получены значения  $\Delta V_k = 7-12$  В,  $\Delta V_a = 15-27$  В.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов В. П., Витковская О. П., Рукавец В. П., Щербаков Г. П. Результаты первых экспериментальных исследований на аэродинамической установке с магнитогазодинамическим ускорением потока воздуха.— В кн.: Установки для исследования аэродинамики и прочности летательных аппаратов (Тр. ЦАГИ), 1979, вып. 1949.
2. Алферов В. П., Витковская О. П. и др. Исследование аэродинамической установки с магнитогазодинамическим ускорением потока газа.— ТВТ, 1979, т. 17, № 1.
3. Алифанов В. П., Батура Н. П. и др. Применение новой методики испытаний и обработки результатов эксперимента в тепловой аэродинамической трубе при исследовании процессов нестационарной теплопередачи.— ИФЖ, 1977, т. 33, № 6.
4. Жбанов А. И., Кошелев В. С., Шевцов В. И. Решение линейных двух- и трехмерных нестационарных задач теплопроводности методом конечных элементов.— В кн.: Материалы VI Всесоюз. конф. по тепломассообмену. Минск, 1980, т. 9.
5. Кириллов В. В., Решетов Е. П., Семенов В. Д. Экспериментальное изучение теплоотдачи в канале МГД-генератора открытого цикла.— ТВТ, 1975, т. 13, вып. 3.
6. Кириллов В. В. К проблеме создания энергетических МГД-генераторов. Исследование влияния реальных физических процессов и особенностей конструкции МГД-канала на характеристики и ресурс работы МГД-генератора. Автореф. дис. д-ра техн. наук. М.: ИВТАН, 1976.
7. Алферов В. П., Витковская О. П. и др. Экспериментальное исследование температурных полей и тепловых потоков в электродных стенках МГД-ускорителя.— ТВТ, 1980, т. 18, № 1.
8. Герман В. О., Зекцер М. П. и др. Исследование разряда между модулями холодной изоляционной стенки.— ТВТ, 1972, т. 10, № 4.
9. Витковская О. П., Рудакова А. И. Расчет течения воздуха в канале МГД-ускорителя с учетом сопротивления канала и теплопередачи в стенки конструкции.— Учен. зап. ЦАГИ, 1974, т. 5, № 4.
10. Алферов В. П., Витковская О. П. и др. Исследование электродинамических характеристик МГД-ускорителя.— ТВТ, 1979, т. 17, № 2.
11. Рознер, Дзунг. КПД крупных энергетических МГД-установок открытого цикла.— В кн.: Тр. VI симпоз. по низк. пробл. магнит. гидродинамики. Питсбург, США, 1965. М.: Наука, 1968.
12. Дорренс У. Х. Гиперзвуковые течения вязкого газа. М.: Мир, 1966.
13. Spalding D. B., Chi S. W. The drag of a compressible turbulent boundary layer on a smooth flat plate with and without heat transfer.— J. Fluid Mech., 1964, v. 18, N 4.
14. Алферов В. П., Витковская О. П., Лабазкин А. П. и др. Исследование разряда в МГД-канале.— В кн.: Тр. восьмой междунар. конф. по МГД-преобразованию энергии. М., 1983, т. 6.

Поступила 23/IV 1984 г.

УДК 533.9

### О КРИТЕРИЯХ ПОДОБИЯ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ СТРУКТУР ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ МПК В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ

А. С. Камруков, Н. П. Козлов, Ю. С. Протасов, С. Н. Чувашев

(Москва)

Импульсные плазменные ускорители, работающие в режимах электромагнитной фокусировки плазменных потоков — магнитоплазменные компрессоры (МПК) — применяются при решении ряда научных и прикладных задач [1—4]. Значительный практический интерес представляют МПК эрозийного типа [4—6], в которых в отличие от описанных в [7—9] газоразрядных МПК плазма образуется в основном из продуктов испарения элементов конструкции (обычно легкоплавкой диэлектрической шайбы) и ускоряется в квазистационарном режиме, формируя плотный высокоскоростной ( $\sim 30-70$  км/с) плазменный поток. При работе МПК эрозийного типа в газовой среде поток эрозийной плазмы тормозится на плотном газе-наполнителе, в результате чего образуется зона ударно-сжатой плазмы, внутренняя энергия которой по порядку величины соответствует энthalпии торможения потока. «Плазменный поршень» отселяет газ-наполнитель, в последнем образуется ударная волна. В [10, 11] показаны возможности применения разрядов МПК эрозийного типа в газах для ис-

следования радиационно-газодинамических и кинетических процессов, в качестве генераторов ударных волн, источников видимого и ультрафиолетового излучения и др. Изучение таких разрядов проводилось главным образом экспериментально [6, 10, 11].

В настоящей работе на основе численного исследования рассматриваемого явления выявлены критерии подобия и получены соотношения, связывающие характеристики установки с параметрами формирующихся при таких разрядах плазменных образований и ударно-волновых структур. Результаты работы могут быть использованы как при анализе и обобщении экспериментальных данных, так и при создании новых электрофизических установок различного целевого назначения на основе разрядов МПК.

**1. Расчетная модель.** Для расчета временных зависимостей параметров плазменного потока применялась построенная в [12] численная модель: ускорение плазмы описывалось на основании электродинамического приближения с учетом малости длины зоны ускорения, передача энергии от накопителя рассчитывалась на основе законов Кирхгофа, при определении эрозионного выхода массы учитывалась инерционность плазмообразования. Соответствующая система уравнений имеет вид

$$(1.1) \quad v_0 = L'I^2/\dot{m}, \quad R_e = Lv_0/2\eta_*, \\ L_{\Pi} \frac{d}{dt} I + (R_e + R_{\Pi}) I = U, \quad \frac{d}{dt} U = -I/C, \\ \dot{m} = m_* \langle A \rangle (0,25 |I| + 0,64 |I^2| + 0,81 |I^3|) - T_* \frac{d}{dt} \dot{m},$$

где  $v_0$  — скорость;  $\dot{m}$  — расход плазмы, мг/мкс;  $I$  — разрядный ток, МА;  $L'$  — погонная индуктивность электродов;  $R_e$  — сопротивление МПК;  $R_{\Pi}$ ,  $L_{\Pi}$  — активное и индуктивное сопротивление контура;  $U$  — напряжение на накопителе емкости  $C$ ;  $\langle A \rangle$  — атомный вес ионов плазмы;  $m_*$  — коэффициент интенсивности плазмообразования;  $T_*$  — параметр инерционности плазмообразования;  $\eta_*$  — кинетический КПД.

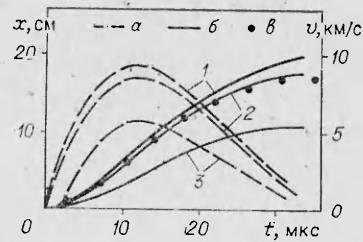
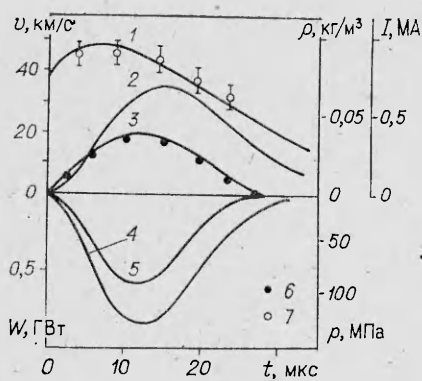
При расчетах учитывались время пролета плазмы от МПК до зоны ударного торможения и связанное с ним изменение временного профиля скоростей и плотностей в струе.

Эффективный радиальный размер головной части плазменного потока  $R$ , необходимый для расчета плотности потока  $\rho_0$ , определялся из экспериментальных данных [10, 11]. Существенно, что в широком диапазоне параметров значение  $R$  вследствие фокусировки потока остается примерно постоянным и определяется в основном радиальными размерами внешнего и внутреннего электродов ускорителя  $R_1$  и  $R_2$ ; при оценках можно считать  $R \simeq 0,35 (R_1 + R_2)$ .

Торможение плазменного потока на газе описывалось в соответствии с подходом, рассмотренным в [10]. Согласно [10], ударно-волновая структура состоит из следующих основных зон: сформированный МПК поток эрозионной плазмы; ударно-сжатая эрозионная плазма; ударно-сжатый газ; холодный невозмущенный газ. Выражения для скоростей ударных волн в эрозионной плазме и газе  $D_1$  и  $D_2$ , скорости движения контактной границы между продуктами эрозии и газом-наполнителем  $v_{\text{кг}}$ , давления за фронтами ударных волн  $p$  имеют вид

$$(1.2) \quad v_{\text{кг}} = v_0/\beta, \quad \beta = 1 + \sqrt{\rho_{\text{г}}/\rho_0}, \quad D_1 = v_{\text{кг}} [\gamma_{\Pi} + 1 - \beta(\gamma_{\text{г}} - 1)]/2, \\ D_2 = v_{\text{кг}} (\gamma_{\text{г}} + 1)/2, \quad p = \frac{\gamma_{\text{г}} + 1}{2} \rho_0 (v_0 - v_{\text{кг}})^2,$$

где  $\rho_{\text{г}}$  — плотность холодного газа;  $\gamma_{\text{г}}$  — эффективный показатель адиабаты газа; в случае воздуха при нормальном давлении для характерных скоростей «плазменного поршня»  $v_{\text{кг}} = 5-15$  км/с  $\gamma_{\text{г}} = 1,2 \pm 0,02$  [13]. Эффективный показатель адиабаты в эрозионной плазме  $\gamma_{\Pi}$  обычно лежит в пределах  $\gamma_{\Pi} = 1,05-1,3$ ; из соотношений (1.2) видно, что такая неопределенность значений  $\gamma_{\Pi}$  несущественно влияет на основные параметры ударно-волновых структур.



Ф и г. 1

Ф и г. 2

Рассматривалось также динамическое давление, оказываемое на стенку при торможении на твердой преграде движущегося плотного слоя ударно-сжатого газа,  $p^* = p(3\gamma_T - 1)/(\gamma_T - 1)$ , представляющее определенный интерес для ряда практических приложений.

2. Сопоставление с экспериментом. Соответствие описанной модели реальным процессам в рассматриваемых разрядах устанавливалось из сравнения результатов расчетов и экспериментов [10, 11] для ряда режимов работы МПК: разряды МПК в воздухе нормальной плотности, размеры электродной системы —  $2R_1 = 10$  мм,  $2R_2 = 40$  мм, емкость накопителя 900 мкФ, начальное напряжение 3—5 кВ. В качестве плазмообразующего вещества МПК использовался фторопласт; в этом случае  $\eta_* = 0,8$ ,  $T_* = 1$  мкс,  $m_* = 0,15$ .

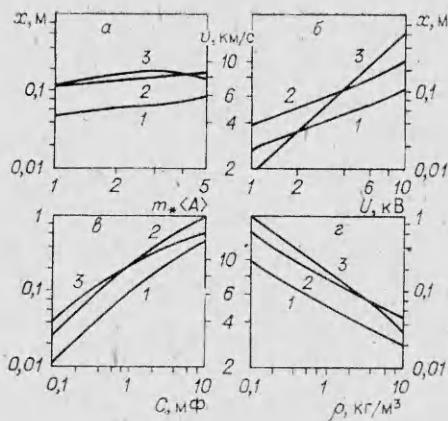
На фиг. 1 приведены некоторые параметры разряда МПК и формируемого плазменного потока при  $U_0 = 5$  кВ. Вследствие уменьшения со временем скорости потока (кривая 1) максимум плотности плазмы перед ударной волной (кривая 2) заметно сдвинут относительно экстремума разрядного тока (кривая 3), а наибольшее значение скоростного напора потока 4 достигается несколько позже, чем максимум кинетической мощности разряда 5.

На фиг. 2 представлены пространственно-временные параметры образующейся при разряде ударно-волновой структуры:  $a$  — расчетные скорости,  $b$  — координаты ударной волны в газе 1, контактной границы между продуктами эрозии и газом 2, ударной волны в эрозионной плазме 3.

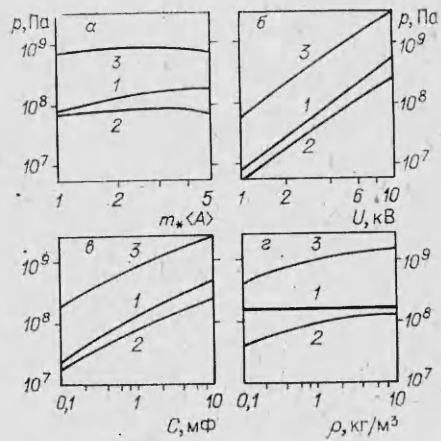
В начале разряда скоростной напор недостаточен для преодоления противодействия среды, слой эрозионной плазмы прижат к поверхности диэлектрика. С ростом скоростного напора потока ударно-волновая структура отходит от МПК, причем пролетные времена соизмеримы с  $t_{1/2}$ . В результате время ударного взаимодействия  $t'_b = 35$  мкс заметно превышает время выделения энергии.

Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными [10, 11] по разрядному току (точки 6, фиг. 1), скорости плазменного потока (точки 7, фиг. 1), координате контактной границы (кривая 6, фиг. 2) показывает, что модель верно описывает динамику энерговыклада в разряд и параметры формируемых потоков эрозионной плазмы, дает правильные значения максимальной скорости «плазменного поршня»  $v'_m = 8,5$  км/с и характерного продольного размера оттеснения газа за полупериод тока  $x'_{1/2} = 18$  см. Момент достижения максимальной интенсивности ударной волны и соответствующая координата контактной границы ( $t'_m = 12$  мкс,  $x'_m = 7$  см) также хорошо согласуются с экспериментом [10, 11]. К аналогичным выводам приводит сопоставление расчетных и экспериментальных данных для других указанных режимов.

Отсюда следует, что построенная модель достаточно хорошо описывает основные особенности плазмодинамики разрядов МПК эрозионного типа в газах. Это позволяет использовать модель для многопараметри-



Фиг. 3



Фиг. 4

ческой оптимизации инженерных расчетов и анализа влияния характеристик установки на основные параметры ударно-волновых структур.

**3. Влияние характеристик установки на параметры ударно-волновых структур.** Вычисления по описанной модели проводились для широких диапазонов изменения энерговыклада в разряд, электротехнических характеристик формирующего контура, свойств газа-наполнителя, размеров рабочего вещества МПК. На фиг. 3 и 4 представлены расчетные зависимости ряда параметров, характеризующих явление: расстояние, на которое газ-наполнитель оттесняется продуктами эрозии за полупериод,  $x_{1/2}$ ; максимальная скорость контактной границы  $v_m$  и ее координата в этот момент  $x_m$  (соответственно кривые 1—3 на фиг. 3); максимальный скоростной напор плазменного потока  $\rho_{0m} v_{0m}^2$ ; экстремальное давление за фронтом ударной волны  $p_m$ ; наибольшее динамическое давление  $p_m^*$  (соответственно кривые 1—3 на фиг. 4).

С помощью имеющихся более подробных расчетных данных проведен анализ указанных зависимостей, показавший следующее.

Параметры ударно-волновых структур слабо зависят от коэффициента интенсивности эрозионного выхода массы  $m_* \langle A \rangle$  (фиг. 3, а, 4, а), хотя последний существенно влияет на величину потока ускоренной массы  $m$  и скорость плазмы  $v_0$  [12]. Это объясняется следующим образом. Параметры ударной волны зависят в основном от срабатываемого скоростного напора  $\rho_0 (v_0 - v_{кр})^2 (\gamma_p + 1)/2$ . При неизменной кинетической мощности МПК  $m v_0^2/2$  скоростной напор  $m v_0$  при росте  $m$  (и падении  $v_0$ ) увеличивается пропорционально  $m^{0,5}$ . С другой стороны, при уменьшении  $v_0$  до уровня  $v_0 \sim (2-5) \cdot v_{кр}$  срабатываемый скоростной напор становится заметно меньше  $m v_0$ , а также уменьшается эффективность передачи энергии от накопителя [12] и кинетическая мощность. При рассматриваемых режимах эти эффекты в значительной мере компенсируют друг друга и параметры ударно-волновых структур слабо зависят от рабочего вещества МПК.

С увеличением энерговыклада в разряд масштабные и динамические характеристики ударно-волновых структур растут. Однако при повышении энерговыклада  $E_0$  путем увеличения емкости накопителя эффективность оттеснения газа намного выше, чем в случае роста  $E_0$  за счет повышения начального напряжения, т. е. роста мощности при  $t_{1/2} = \text{const}$  (см. фиг. 3, б, 4, б), это объясняется увеличением времени ударно-волнового взаимодействия и меньшим противодействием газа.

Повышение плотности газа  $\rho_g$  приводит к замедлению продвижения «плазменного поршня» (см. фиг. 3, г, 4, г). В области малых плотностей за счет высоких  $v_{кр}$  падает эффективность срабатывания скоростного на-

пора (что снижает давление и темпы роста  $v_{kr}$ ), а за счет больших  $x_{1/2}$  и пролетных эффектов увеличивается время ударно-волнового взаимодействия (что дает еще больший рост  $x_{1/2}$ ).

**4. Критерии подобия.** Анализ полученных расчетных данных показывает, что изменение одних факторов можно скомпенсировать изменением других, при этом явления оказываются подобными качественно и количественно. Это позволяет выделить ряд критериев подобия, определяющих характер протекания процессов, и получить обобщенные критериальные зависимости, количественно описывающие явления при разрядах МПК эрозионного типа в газах.

Плотность газа-наполнителя и радиальный размер головной части потока входят в уравнения описанной модели только в виде комплекса  $m_{\Pi} = \rho_{r\Pi} R^2$  — погонной массы «сгребаемого» газа.

Из анализа расчетов с изменением энерговклада путем варьирования емкостью и напряжением на накопителе следует, что максимальная скорость контактной границы  $v_m$  является функцией максимальной мощности энерговклада  $W_m$ . Это объясняется тем, что значение  $v_m$  определяется срабатываемым в ударной волне скоростным напором плазменной струи, а последний в достаточно широких пределах практически линейно зависит от электрической мощности разряда. Давления  $p_m$  и  $p_m^*$  также являются функциями максимальной мощности.

Расстояние  $x_{1/2}$  примерно пропорционально  $v_m t_b$ , а  $x_m$  пропорционально  $v_m t_m$ . Здесь время ударно-волнового взаимодействия  $t_b \cong t_{1/2} + x_{1/2}/\langle v_0 \rangle$ ; время достижения максимальных параметров ударных волн  $t_m \cong t_W + x_m/\langle v_0 \rangle$ ;  $t_W$  — время максимума электрической мощности разряда МПК; для емкостных накопителей энергии времена  $t_{1/2}$  и  $t_m$  можно найти по формулам для колебательного контура при  $R_e = L'\langle v_0 \rangle/2\eta_{\kappa}$ ;  $\langle v_0 \rangle$  — среднemasсовая скорость плазменных потоков, ее можно определить из (1.1). Такое подобие связано с близким по форме для различных режимов временным профилем кинетической мощности МПК за полупериод разряда.

Расчеты показали, что явной зависимостью рассматриваемых параметров от  $m_{\kappa} \langle A \rangle$  в первом приближении можно пренебречь. Таким образом, значения характеристических параметров ударно-волновых структур при разрядах МПК эрозионного типа в газах определяются в основном погонной массой газа  $m_{\Pi}$ , максимальной электрической мощностью  $W_m$  и временами  $t_b$  и  $t_m$  (а также показателем адиабаты газа  $\gamma_r$ ).

Это позволяет обобщить результаты проведенных расчетов в виде критериальных соотношений для характеристических параметров.

Полученные зависимости имеют вид

$$(4.1) \quad x_{1/2}/x'_{1/2} = (W_m/W'_m)^{0,42} (m_{\Pi}/m'_{\Pi})^{-0,4} (t_b/t'_b)^1;$$

$$(4.2) \quad v_m/v'_m = (W_m/W'_m)^{0,42} (m_{\Pi}/m'_{\Pi})^{-0,4};$$

$$(4.3) \quad x_m/x'_m = (W_m/W'_m)^{0,42} (m_{\Pi}/m'_{\Pi})^{-0,4} (t_m/t'_m)^1;$$

$$(4.4) \quad p_m/p'_m = (W_m/W'_m)^{0,8} (m_{\Pi}/m'_{\Pi})^{0,25};$$

$$(4.5) \quad p_m^*/p_m'^* = (W_m/W'_m)^{0,8} (m_{\Pi}/m'_{\Pi})^{0,25} (\Gamma/\Gamma')^1, \quad \Gamma \equiv (3\gamma_r - 1)/(\gamma_r - 1)$$

(штрихами отмечены параметры рассмотренного выше режима разряда). Расчеты по (4.1)—(4.5) наиболее надежны при не очень больших отклонениях режимов от «базового».

Следует отметить, что на основе (4.1)—(4.5) возможно проведение оценок для работы МПК как с емкостными накопителями, так и с генераторами других типов.

Авторы выражают признательность Ю. В. Бойко за помощь в расчетах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин С. Д., Козлов Н. П., Лесков Л. В. Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975.
2. Морозов А. И. Термоядерные системы с плотной плазмой.— Вестн. АН СССР, 1969, вып. 6.
3. Mather J. W. Formation of a high-density deuterium plasma focus.— Phys. Fluids, 1965, v. 8, N 2.
4. Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С. Динамика и излучение открытых (вакуумных) плазмодинамических разрядов типа «плазменный фокус»: Обзор.— ТВТ, 1982, т. 20, № 2.
5. Козлов Н. П., Протасов Ю. С. и др. Экспериментальное исследование плазменного фокуса в ускорителях эрозионной плазмы. I.— ЖТФ, 1973, т. 43, вып. 4; II — 1974, т. 44, вып. 12; III — 1977, т. 47, вып. 8; IV — 1981, т. 51, вып. 4; V — 1982, т. 52, вып. 8.
6. Минько Л. Я. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. Минск: Наука и техника, 1970.
7. Морозов А. И., Соловьев Л. С. Стационарные течения плазмы в магнитном поле.— В кн.: Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат, 1974, вып. 8.
8. Вальков Ю. А., Молчанов В. С., Скворцов Ю. В. Динамика токовой оболочки в импульсном коаксиальном инжекторе.— В кн.: Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973.
9. Комельков В. С., Кузнецов А. П. и др. Разлет плазменной токовой оболочки.— ПМТФ, 1978, № 5.
10. Камруков А. С., Козлов Н. П. и др. О возможности создания высокоярких источников излучения на основе ударного торможения гиперзвуковых плазменных потоков в плотных газах.— ЖТФ, 1982, т. 52, № 11.
11. Семенов А. М. Динамика и излучение сильноточных плазмодинамических разрядов МПК в газах.— В кн.: Тез. докл. V Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. М., 1982.
12. Камруков А. С., Козлов Н. П. и др. Расчет параметров плазменного потока импульсного эрозионного плазменного ускорителя.— ПМТФ, 1984, № 2.
13. Попов Е. Г., Цикулин М. А. Излучательные свойства ударных волн в газах. М.: Наука, 1977.

Поступила 2/VI 1984 г.

УДК 532.546

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА С УЧЕТОМ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ю. Н. Гордеев, Н. А. Кудряшов, В. В. Мурзенко

(Москва)

1. При описании движения газа по трубам и магистральным трещинам, а также при фильтрации газа через пористые среды в качестве уравнения движения, как правило, используют эмпирические законы (закон Дарси, соотношение Форхгеймера и т. д. [1, 2]).

Система уравнений газовой динамики с учетом сил сопротивления приведена в [3, 4], в [5] проведено исследование систем квазилинейных уравнений общего типа.

В данной работе рассматривается движение газа, которое описывается уравнением Эйлера с силами сопротивления.

Система уравнений, которая описывает движение изотермического газа, имеет вид

$$(1.1) \quad \frac{\partial}{\partial t} \rho + r^{-\nu} \frac{\partial}{\partial r} (r^{\nu} \rho u) = 0;$$

$$(1.2) \quad \frac{\partial}{\partial t} j + r^{-\nu} \frac{\partial}{\partial r} (r^{\nu} j u) = - \frac{\partial p}{\partial r} - F;$$

$$(1.3) \quad p = c^2 \rho,$$

где  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $u$  — скорость движения;  $j = \rho u$  — плотность потока газа;  $c$  — изотермическая скорость звука;  $F$  — сила сопротивления при движении газа;  $\nu$  — показатель симметрии ( $\nu = 0$  — плоская задача,  $\nu = 1$  — цилиндрическая задача,  $\nu = 2$  — сферически-симметричная задача);  $r$  — координата;  $t$  — время.