

## ЛИТЕРАТУРА

1. Громека И. С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубках.— Уч. зап. Казанск. ун-та, 1882, № 1–2, с. 41–72.
2. Байбигов Б. С., Орешкин О. Ф., Прудовский А. М. Сопротивление трения при ускоренном течении в трубе.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 5, с. 137–139.
3. Попов Д. Н. Обобщенное уравнение для определения касательного напряжения на стенке трубы при неустановившемся движении вязкой жидкости.— Изв. вузов. Транспортное и энергетич. машиностр., 1967, № 5, с. 52–57.
4. Слезкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гостехиздат, 1955. 519 с.
5. Прандтль Л. Гидроэромеханика. М.: Изд-во иностр. лит., 1951. 575 с.
6. Логов И. Л., Соловьев Б. С. Экспериментальные исследования одномерных нестационарных потоков.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1981, № 5, с. 113–122.
7. Логов И. Л., Соловьев Б. С. Экспериментальное исследование нестационарных потоков несжимаемой жидкости.— 5-й Всес. съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докл. Алма-Ата, 1981, с. 368.

Москва

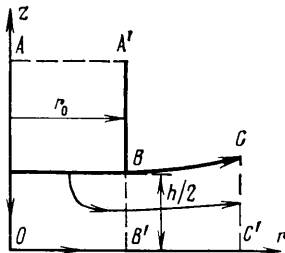
Поступила в редакцию  
23.XII.1982

УДК 533.6.011

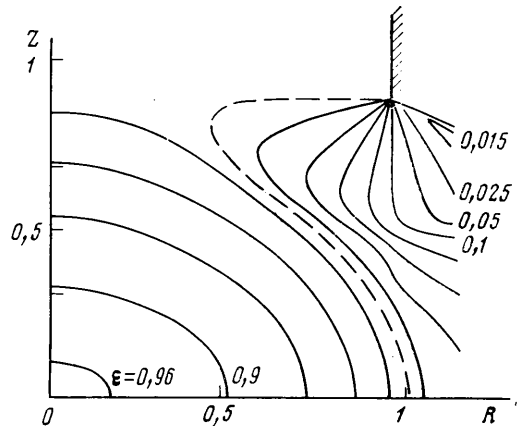
### О СТРУКТУРЕ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ЩЕЛИ В ТРУБОПРОВОДЕ

КОСОЛАПОВ Ю. С., СИВОБОРОД А. В.

Структура потока газа, возникающая при разрыве трубопровода, зависит от ширины щели  $h$ , образующейся между концами труб. Если относительная ширина щели  $H = h/d$  ( $d$  — диаметр трубопровода) невелика, то структура течения и его физические особенности качественно аналогичны тем, которые имеет процесс истечения газа из плоской щели. Когда же  $H$  достаточно велика, реализуется ударное взаимодействие сверхзвуковых струй. При этом существует такая ширина щели  $H_*$ , при которой происходит переход от безударной структуры течения к ударной. Приближенная оценка величины  $H_*$ , основанная на предположении об однородности распределений критических параметров в поперечном сечении трубы и по щели,



Фиг. 1



Фиг. 2

дает значение  $H_* = 0,5$ . Для уточнения величины  $H_*$  необходимо учитывать неоднородный характер течения.

В настоящей работе рассматривается двумерное стационарное истечение газа из кольцевой щели, образующейся при разведении концов труб вдоль их общей оси симметрии. Исследуется перестройка потока от безударного в окрестности оси симметрии течения к ударному. В результате численного исследования находится величина  $H_*$  и рассматривается влияние на нее отношения давлений  $\epsilon_a$  ( $\epsilon_a = P_a/P_0$ ;  $P_a$  — давление в окружающем пространстве,  $P_0$  — давление торможения) и показателя адиабаты  $\kappa$ . Для численной реализации используется схема Годунова [1].

Решение системы уравнений, описывающих нестационарное осесимметричное течение идеального газа (см., например, [2]), ищется в области  $AOB'C'SBA'$  фиг. 1. На границе  $AA'$ , через которую газ втекает, задавались однородные распределения полной энтальпии и энтропийной функции  $B = P_0 \rho_0^{-\kappa}$ , где  $P_0$  и  $\rho_0$  — давление и плот-

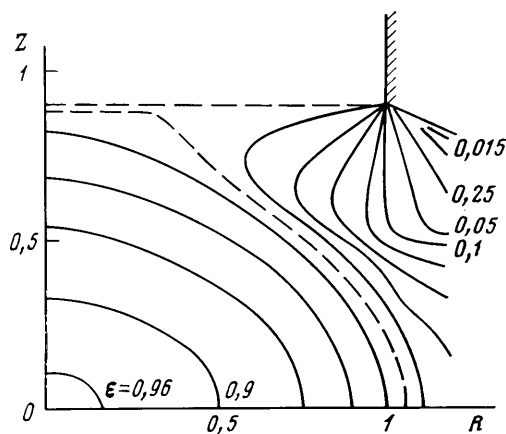
ность торможения, а также соотношение между составляющими вектора скорости. При удалении границы  $AA'$  на бесконечность реализуется однородный поток и радиальная компонента скорости  $V=0$ . На оси симметрии  $AO$ , плоскости симметрии  $OC'$  и стенке трубы  $A'B$  задавались условия непротекания. На свободной границе  $BC$  задавалось давление окружающей среды  $P_a$ . В работе рассматривались сверхзвуковые режимы истечения ( $\epsilon_a < \epsilon_*$ , где  $\epsilon_*$  — критическое отношение давлений), поэтому на границе  $CC'$ , через которую газ вытекает, никаких условий не выставлялось. Граница  $CC'$  выбиралась так, что нормальная к ней компонента скорости была больше значения местной скорости звука. Решение стационарной задачи находилось в процессе установления по времени.

Численное решение задачи осуществлялось с помощью метода Годунова. В области струи  $R > 1$  (где  $R = r/r_0$ ,  $r_0$  — радиус трубы) использовалась полупрямая подвижная сетка, следящая за границей струи, а при  $0 \leq R \leq 1$  — прямоугольная неподвижная сетка. Построение разностной схемы для подвижных сеток подробно рассмотрено в [2].

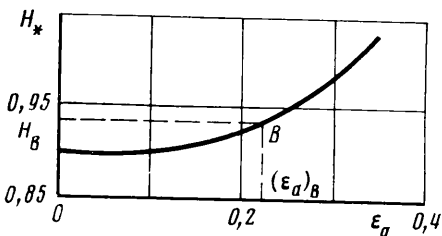
Влияние расстояния  $l$  от торца трубы до сечения трубы, в котором выставлялись граничные условия, на величину погрешности решения оценивалось с помощью предварительных расчетов. Когда погрешности, связанные с влиянием  $l$ , становились значительно ниже общего уровня ошибок метода, считалось, что входное сечение расположено достаточно далеко. Так, при расчетах в диапазоне  $0,85 \leq l \leq 1,05$  величина  $l = l/r_0$  изменялась в пределах  $1 \leq L \leq 1,5$ . Общее число ячеек расчетной области составляло примерно 1700, при этом область струи  $BCB'C'$  разбивалась на  $30 \times 20$  ячеек (30 ячеек — в поперечном сечении струи); область  $AA'B'B'O$  разбивалась на  $45 \times 25$  ячеек (25 ячеек — по радиусу). Расчеты проводились на ЭВМ БЭСМ-6. Время расчета одного варианта составляло 5 ч.

Выше отмечалось, что физические особенности процесса истечения газа из малых щелей ( $H < H_*$ ) в трубопроводе качественно такие же, как и при истечении газа из плоских щелей. Поэтому и при двумерном истечении газа из щели в трубопроводе (при  $\epsilon_a < \epsilon_*$ ) коэффициент расхода должен быть меньше 1. Звуковая линия отличаться от прямой и, следовательно, величина  $H_*$  должна быть больше 0,5. Поскольку коэффициент расхода при истечении газа из плоских щелей и осесимметричных отверстий зависит от  $\epsilon_a$  и  $\chi$  [3], то, по-видимому, и  $H_*$  будет зависеть от  $\epsilon_a$  и  $\chi$ . Характер зависимости  $H_*$  ( $\epsilon_a$ ,  $\chi$ ), вероятно, будет определяться зависимостью коэффициента расхода от  $\epsilon_a$  и  $\chi$ .

При истечении газа из плоских щелей и осесимметричных отверстий с ростом  $\epsilon_a$  и  $\chi$  величина коэффициента расхода уменьшается [3]. При истечении газа из кольцевой щели в трубопроводе с ростом  $\epsilon_a$  и  $\chi$  также следует ожидать уменьшения коэффициента расхода и, следовательно, увеличения  $H_*$ . Конкретный вид зависимости



Фиг. 3



Фиг. 4

$H_*$  ( $\epsilon_a$ ,  $\chi$ ) может быть получен в результате численного решения задачи о стационарном истечении газа из щели в трубопроводе.

Рассмотрим результаты численного анализа влияния  $\epsilon_a$  и  $\chi$  на величину  $H_*$ . Прежде всего остановимся на том, как фиксировалась величина  $H_*$  при расчетах. Считалось, что перестройка структуры течения произошла, если поток оказался запертым по торцевому сечению трубопровода. В расчетной плоскости этому соответствует появление прямой звуковой линии, совпадающей с проекцией выходного сечения трубы, и зарождение слабой ударной волны в окрестности оси симметрии течения у торцевого сечения трубы. Минимальная величина  $H_*$  при которой в расчетах появлялась прямая звуковая линия, считалась шириной щели  $H_*$ .

На фиг. 2, 3 для двух значений  $H = 0,89$ ;  $0,9$  при  $\epsilon_a = 0,015$  и  $\chi = 1,3$  показаны результаты расчетов в виде линий  $\epsilon = \text{const}$ , которые дают представление о перестройке структуры потока. (На фиг. 2, 3 линии  $\epsilon = \text{const}$  в области  $0,1 \leq \epsilon \leq 0,9$  приведены с шагом 0,1. Штрихами нанесены звуковые линии  $M=1$ , где  $M$  — число Маха.)

Расчеты показали, что с ростом  $H$  звуковая поверхность проникает все глубже

в направлении к оси симметрии потока, «захватывая» все большую часть торцевого сечения трубы. В конце концов часть площади торцевого сечения трубы, где скорости дозвуковые, становится равной нулю ( $H \geq H_*$ ) (фиг. 3). В окрестности оси симметрии потока появляется слабая ударная волна, интенсивность которой с ростом  $H$  увеличивается и она смещается в направлении к плоскости симметрии течения. В данном случае ( $\epsilon_a = 0,015$  и  $\kappa = 1,3$ ) величина  $H_*$  оказалась равной 0,9, что почти вдвое превышает значение  $H_* = 0,5$ , полученное в одномерном приближении.

Интересно, что величине  $H_*$  можно дать еще одну интерпретацию. Так, при  $H > H_*$  и  $\epsilon_a < \epsilon_*$  поток в пределах трубы однородный звуковой (в рамках модели идеального газа) и поэтому его можно рассматривать как одномерный (в пределах трубы). Когда же  $H < H_*$ , течение в трубе носит двумерный характер и, следовательно, величину  $H_*$  можно трактовать как такую ширину щели, при которой происходит переход от двумерного, в пределах трубы, течения к одномерному. Очевидно, что эти два определения величины  $H_*$  эквивалентны при  $\epsilon_a < \epsilon_*$ , поскольку момент перехода потока к однородному звуковому совпадает с моментом зарождения слабой ударной волны в окрестности оси симметрии течения у торцевого сечения трубопровода.

Влияние на величину  $H_*$  режимного параметра  $\epsilon_a$  при  $\kappa = 1,3$  показано на фиг. 4. Как и предполагалось, с ростом  $\epsilon_a$   $H_*$  возрастает, причем с увеличением  $\epsilon_a$  скорость роста  $H_*$  ( $\partial H_*/\partial \epsilon_a$ ) увеличивается. Это обстоятельство связано с характером зависимости коэффициента расхода от  $\epsilon_a$ . (Так, при истечении газа из плоских щелей и осесимметричных отверстий с ростом  $\epsilon_a$  при  $\epsilon_a \leq \epsilon_*$  возрастает величина  $[\partial \mu / \partial \epsilon_a]$ . Здесь  $\mu$  — коэффициент расхода.)

Такое поведение  $H_*(\epsilon_a)$  показывает, что существуют ширины щелей, для которых (при  $H = \text{const}$ ) в зависимости от  $\epsilon_a$  возможно как безударное истечение, так и ударное. Рассмотрим, например, щель шириной  $H_B$  (фиг. 4) и обозначим точкой  $B$  точку пересечения прямой  $H_B = \text{const}$  с кривой  $H_*(\epsilon_a)$ , а через  $(\epsilon_a)_B$  — соответствующее ей значение  $\epsilon_a$ . Тогда при  $\epsilon_a > (\epsilon_a)_B$  ( $H_B < H_*$ ) течение будет безударным и, наоборот, при  $\epsilon_a < (\epsilon_a)_B$  ( $H_B > H_*$ ) течение будет ударным. Если процесс безударного истечения из таких щелей (например,  $H = H_B$  и  $\epsilon_a > (\epsilon_a)_B$  на фиг. 4) сопровождается падением давления в окружающем пространстве, то безударным он останется лишь до  $\epsilon_a = (\epsilon_a)_B$ , при дальнейшем понижении давления  $\epsilon_a < (\epsilon_a)_B$  истечение станет ударным (это замечание справедливо, если процесс истечения газа можно считать квазистационарным).

Численное исследование влияния физических свойств газа ( $\kappa$ ) на величину  $H_*$  показало, что с ростом  $\kappa$  величина  $H_*$  увеличивается. Например, при  $\epsilon_a \leq 0,015$  зависимость  $H_*(\kappa)$  в диапазоне  $1,1 \leq \kappa \leq 1,67$  близка к линейной и с высокой точностью ( $\delta \leq 0,5\%$ ) может быть аппроксимирована уравнением

$$H_*(\kappa) = A\kappa + B \quad (A = 0,16, B = 0,695)$$

По-видимому, с ростом  $\epsilon_a$  следует ожидать более сильного влияния  $\kappa$  на  $H_*$ . (В [3] было показано, что с ростом  $\epsilon_a$  при  $\epsilon_a \leq \epsilon_*$  влияние  $\kappa$  на величину коэффициента расхода увеличивается.)

Проведенный численный анализ полностью подтвердил общие соображения о том, что в рамках двумерной модели истечения величина  $H_*$  является возрастающей функцией отношения давлений  $\epsilon_a$  и показателя адиабаты  $\kappa$ , а также позволил получить количественную информацию о зависимости  $H_*(\epsilon_a, \kappa)$ . Минимальная величина  $H_*$ , найденная в рамках двумерной модели истечения, оказалась приблизительно вдвое больше величины  $H_* = 0,5$ , полученной в одномерном приближении. Заметим, что в одномерном приближении, предполагающем однородные распределения параметров по щели и в поперечном сечении трубопровода, величина  $H_*$  определяется только из геометрического условия равенства площадей щели и поперечного сечения трубопровода и поэтому не является функцией  $\epsilon_a$  и  $\kappa$ , а есть постоянная, равная 0,5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отходящей ударной волной. — Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 6, с. 1020—1050.
2. Годунов С. К., Забродин А. В., Певинов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
3. Филиппов Г. А., Салтанов Г. А., Сивобород В. А., Косолапов Ю. С. Истечение газов с различными показателями адиабаты. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1982, № 1, с. 121—126.

Москва

Поступила в редакцию  
28.VI.1982