

## Влияние плотности газа на силовое действие турбулентной струи

© М.М. Мордасов, А.П. Савенков

Тамбовский государственный технический университет,  
392000 Тамбов, Россия  
e-mail: savencow@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 17 ноября 2015 г.)

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния плотности газа на силовое действие газовой струи при контроле параметров истечения по давлению перед отверстием. Выявлено отсутствие значимого влияния плотности. Предпринята попытка описания зависимости силы действия струи от давления перед отверстием истечения посредством изэнтропических выражений. Установлено, что единственным параметром газа, способным влиять на силовое действие струи, является показатель адиабаты.

Истечение газа из резервуара сопровождается изменением его плотности. Объемный и массовый расходы газа зависят от плотности. Величина плотности в явном или неявном виде участвует во всех выражениях, описывающих процессы истечения. Несмотря на это, результаты теоретических исследований демонстрируют отсутствие влияния плотности на силовое действие газовой струи на преграду при определении силы по давлению перед отверстием истечения [1].

Большинство исследователей взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости [2–6] контролируют интенсивность струйного воздействия по расходу газа, что требует учета его плотности, уменьшает точность и создает другие трудности. Отсутствие информации о постоянстве силового действия струи при контроле давления перед отверстием истечения заставило авторов работ [5,6] проводить исследования механического взаимодействия струй различных газов с жидкостью для выявления влияния их свойств на параметры взаимодействия. По результатам таких исследований нельзя сделать вывод о том, на какой процесс влияет плотность газа: истечение из отверстия или взаимодействие с поверхностью жидкости.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния плотности газа на силу действия турбулентной струи на преграду.

Силовое воздействие газовой струи на преграду целесообразно определять по формуле [1]

$$F = k \frac{\pi d^2 \mu}{2} P, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент формы преграды,  $d$  — диаметр отверстия, из которого вытекает струя,  $m$ ;  $\mu$  — коэффициент расхода;  $P$  — избыточное давление газа перед отверстием (подразумевается истечение газа в атмосферу), Па.

Из уравнения (1) видно, что сила  $F$  не зависит от плотности газа  $\rho_g$ . Это легко объяснить тем, что плотность в равной степени влияет на процессы истечения и взаимодействия с преградой. Например, при увеличении

плотности при неизменном давлении  $P$  уменьшится скорость истечения, но при взаимодействии с преградой это уменьшение компенсируется увеличением массового расхода, и сила  $F$  останется неизменной. Однако можно предположить следующие причины зависимости силы  $F$  от плотности  $\rho_g$  в реальных условиях:

— газ перед отверстием истечения находится при большем давлении, а следовательно, имеет большую плотность, чем газ, взаимодействующий с преградой,

— в процессе распространения струи от отверстия истечения к поверхности преграды в нее интенсивно вовлекаются молекулы атмосферного воздуха, который может отличаться по составу и плотности от газа, вытекающего из отверстия,

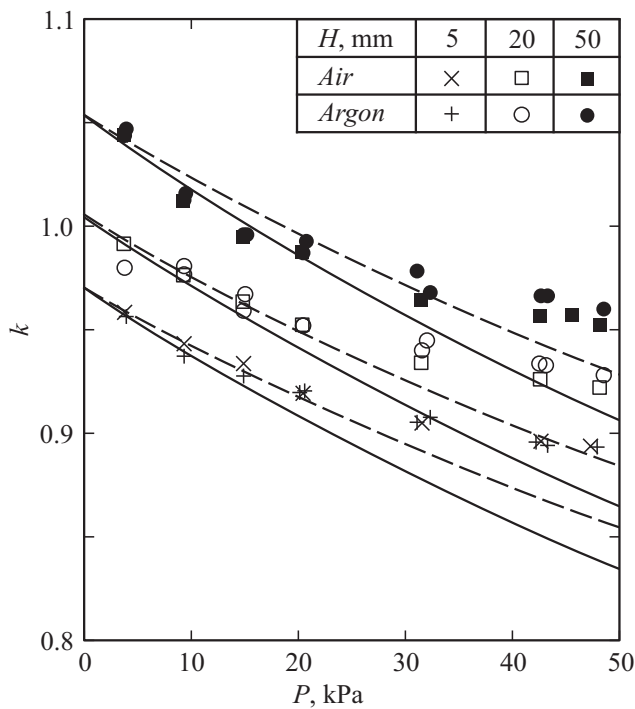
— коэффициент  $k$  зависит от давления  $P$  (рис. 1), что может быть обусловлено изменением плотности газа  $\rho_g$ .

В условиях изменения давления в качестве характеристики инерционных свойств газа целесообразно выбирать молярную массу  $M$ . При изотермическом течении плотность газа пропорциональна давлению в соответствии с уравнением газового состояния

$$\rho_g = \frac{\bar{P}M}{RT},$$

где  $\bar{P}$  — абсолютное давление газа, Па;  $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура, К. При адиабатическом течении на изменение плотности также оказывает влияние показатель адиабаты  $\gamma$  [7].

Для экспериментальной проверки наличия зависимости силы  $F$  от плотности  $\rho_g$  использованы газы с разной молярной массой, показателем адиабаты и вязкостью: атмосферный воздух и аргон. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. В установленном на основании  $б$  штативе закреплена струйная трубка с диафрагмой толщиной 0.18 mm в торце. Диафрагма имеет отверстие истечения  $4$  диаметром 0.89 mm ( $\mu = 0.68$ ). На площадке, соединенной с основанием  $б$ , размещены лабораторные электронные весы  $1$  типа ВЛ-120С с погрешностью не более 1 mg. Диск  $3$  массой  $m$



**Рис. 1.** Зависимости коэффициента  $k$  формы преграды от давления  $P$  перед отверстием истечения струи при различных значениях расстояния  $H$ : точки — экспериментальные данные, сплошные линии — уравнение (7) для  $\gamma = 1.4$  (воздух), штриховые — для  $\gamma = 1.67$  (аргон).

расположен на расстоянии  $H$  от отверстия 4 и соединен с чувствительным элементом весов 1 посредством подвеса 2.

В исходном состоянии на чувствительный элемент весов 1 действует вес  $mg$ , где  $g$  — ускорение свободного падения ( $m/s^2$ ), диска 3 и подвеса 2. Струя, вытекающая из отверстия 4, воздействует на диск 3 с силой  $F$ , противоположной по направлению весу  $mg$ , уменьшая его. После установки нуля в процессе измерений силы  $F$  весы дают отрицательные показания. Сила  $F$  определяется произведением модуля показаний весов на ускорение свободного падения  $g$ . Давление  $P$  перед отверстием 4 истечения регулируется при помощи переменного пневматического сопротивления 5 и контролируется по показаниям цифрового вольтметра 8, подключенного к выходу калиброванного преобразователя давления 7 типа МРХ5050РР. На вход пневматического сопротивления 5 с одного из редукторов давления (на схеме не показаны) подается воздух или аргон.

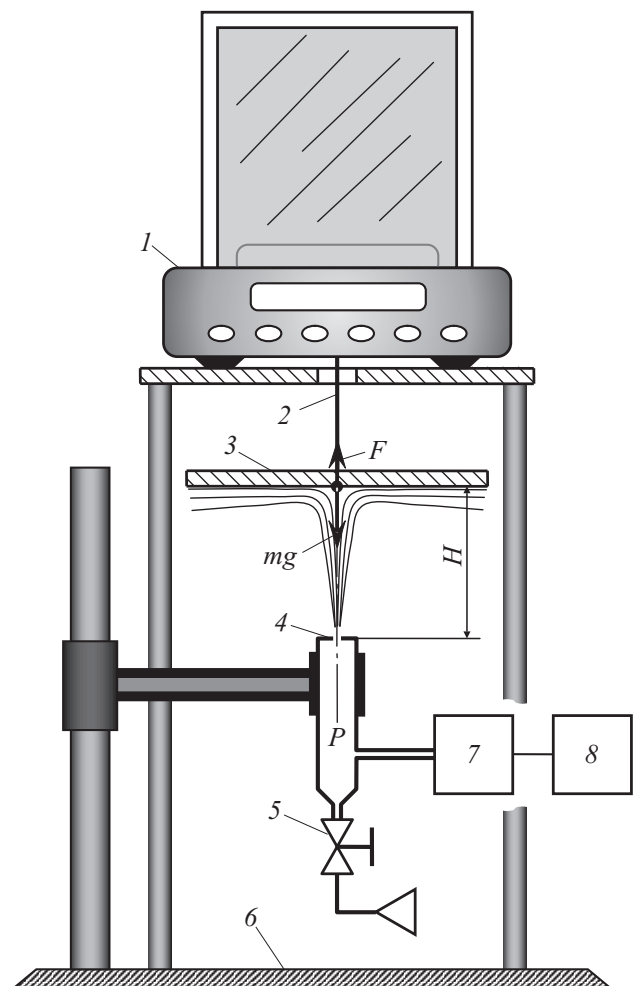
Расстояние  $H$  от отверстия 4 истечения струи до поверхности диска 3 варьировалось на трех уровнях: 5 mm (диаметр преграды 13 mm), 20 и 50 mm (диаметр преграды 50 mm). Диапазон изменения давления  $P$  составил от 4 до 50 kPa.

Отношение молярных масс используемых в эксперименте газов равно 1.38, т.е. изменение плотности  $\rho_g$  составляет  $\sim 30\%$ . Относительная разность результатов

измерений силы  $F$  для аргоновых и воздушных струй при прочих равных условиях не превышает 1.5%, что соизмеримо с относительной погрешностью измерения давления  $P$ . Следовательно, влияние плотности  $\rho_g$  газа на силу  $F$  следует признать пренебрежимо малым.

Эксперименты проведены в широком диапазоне расстояния  $H$ , что сопровождалось существенным изменением параметров течения газа и изменением коэффициента  $k$ . Влияние расстояния  $H$  на коэффициент  $k$  объясняется влиянием соотношения размеров струи и преграды на результирующую силу  $F$  [1]. В связи с тем, что для различных газов получены одинаковые зависимости при разных  $H$ , можно утверждать, что на параметры обтекания газом преграды не влияет плотность газа, вытекающего из отверстия, и процессы смешения этого газа с атмосферой.

Из рис. 1 видно, что при изменении давления в диапазоне от нуля до 50 kPa коэффициент формы меняется не менее чем на 10%. Характер влияния давления  $P$  на коэффициент  $k$  не зависит от диаметра  $d$  отверстия [8].



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки для определения силового действия газовой струи. Объяснение обозначений приведено в тексте.

Влияние параметров газа в струе (плотности, вязкости, давления, показателя адиабаты) на силу его действия на преграду прежде всего может быть обусловлено процессом истечения. Распространение струи после истечения газа из отверстия подчиняется закону сохранения количества движения. Независимо от изменения параметров газа в струе количество движения, поступающее на поверхность преграды, равно количеству движения газа, вытекающего из отверстия [9].

При выводе уравнения (1) использована упрощенная функция

$$G = \mu S \sqrt{2\rho_g P}, \quad (2)$$

не учитывающая, что течение газа адиабатическое [10]. В (2)  $G$  — массовый расход газа, kg/s;  $S = \pi d^2/4$  — площадь отверстия, m<sup>2</sup>. Аппроксимация реальной зависимости расхода от перепада давления функцией (2) может быть причиной изменения коэффициента  $k$  под влиянием давления  $P$ .

При больших перепадах давления истечение газа из отверстия описывается формулой Сен-Венана–Ванцеля

$$w = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{2\bar{P}}{\bar{\rho}_g} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, \quad (3)$$

где  $w$  — скорость истечения газа из отверстия, m/s;  $\bar{\rho}_g$  — плотность газа при давлении  $\bar{P}$ , kg/m<sup>3</sup>;  $P_0$  — атмосферное давление, Pa [7]. Из уравнения (3) с использованием формулы адиабатического изменения плотности газа [7] можно получить уравнение для массового расхода [11]

$$G = \mu S \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma - 1} 2\bar{P}\bar{\rho}_g \left( \frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}. \quad (4)$$

Для определения силы  $F$  действия струи на преграду воспользуемся уравнением, полученным в работе [9]

$$F = kGw. \quad (5)$$

Подставляя (3) и (4) в (5), получим

$$F = \bar{k} \frac{\pi d^2 \mu}{2} \bar{P} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

или

$$F = \bar{k} \frac{\pi d^2 \mu}{2} (P + P_0) \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{P_0}{P + P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \times \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P + P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \quad (6)$$

где  $\bar{k}$  — коэффициент формы, не учитывающий адиабатическое течение газа в отверстии.

В уравнении (6) так же, как и в формуле (1), отсутствуют какие-либо величины, характеризующие инерционные свойства газа. Множители, стоящие в правой

части уравнения (6), в формуле (1) представлены единственным коэффициентом  $k$ , чем может быть обусловлена его зависимость от давления  $P$ . Для определения зависимости коэффициента  $k$  от давления  $P$  поделим (6) на (1), получим

$$k = \bar{k} \frac{(P + P_0)}{P} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{P_0}{P + P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P + P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]. \quad (7)$$

Зависимости  $k(P)$  для воздуха и аргона, выраженные уравнением (7), показаны на рис. 1 линиями (значения  $\bar{k}$  равны 0.970, 1.004, 1.053 для  $H$ , равных 5, 20 и 50 mm соответственно). Из анализа графиков и уравнения (7) следует, что слабое систематическое отклонение данных для воздуха и аргона, наблюдаемое на рис. 1, может быть обусловлено только различными значениями показателя адиабаты  $\gamma$ , но не молярной массы  $M$ .

Из рис. 1 видно, что теоретическая зависимость (7) удовлетворительно описывает реальное изменение коэффициента  $k$  при давлении не более 20 кПа. При давлении 50 кПа отклонение уравнения (7) от экспериментальных данных достигает 7%. Это следует объяснить тем, что уравнения (3), (4) и (6) не учитывают всех процессов, происходящих при истечении газа из отверстия в тонкой стенке. Усложнение этих уравнений введением дополнительных множителей, учитывающих прочие факторы, нецелесообразно, так как уже в текущем виде уравнения (6) и (7) крайне неудобны для использования.

Для учета влияния давления  $P$  на коэффициент  $k$  можно аппроксимировать зависимость  $k(P)$  в диапазоне до 30 кПа линейной функцией с относительной погрешностью не более 1% или константой с погрешностью не более 4%. Многие реальные газы имеют показатель адиабаты, равный 1.4, а большинство из них укладываются в диапазон 1.2–1.7. Если провести аппроксимацию зависимости  $k(P)$  в диапазоне до 30 кПа для показателя адиабаты  $\gamma = 1.4$ , то при изменении этой величины в диапазоне 1.2–1.7 дополнительная погрешность аппроксимации составит не более 1.6%. Для уменьшения влияния давления  $P$  на коэффициент  $k$  в случае, если это возможно, целесообразно увеличить диаметр  $d$  отверстия истечения, так как для достижения той же силы  $F$  потребуется меньшее давление.

Из результатов теоретических и экспериментальных исследований, представленных в настоящей работе, следует, что при использовании струй различных газов не требуется применять корректирующие коэффициенты при переходе от одного газа к другому. Однако при этом следует учитывать, что, несмотря на постоянство силового действия струи, массовый и объемный расходы будут изменяться. Это замечание является важным в связи с большим диапазоном изменения молярной массы реальных газов. При контроле силового действия струи по расходу газа плотность будет оказывать значительное влияние [1,8,9].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-31060-мол\_а.

## Список литературы

- [1] Мордасов М.М., Савенков А.П., Чечетов К.Е. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 141–144.
- [2] Park S.S., Dyussekenov N., Sohn H.Y. // Metallurgical and Materials Transactions B. 2010. Vol. 41B. N 1. P. 51–62.
- [3] Hwang H.Y., Irons G.A. // Metallurgical and Materials Transactions B. 2012. Vol. 43B. N 2. P. 302–315.
- [4] Solórzano-López J., Zenit R., Ramírez-Argáez M.A. // Appl. Mathematical Modeling. 2011. Vol. 35. N 10. P. 4991–5005.
- [5] Turkdogan E.T. // Chem. Engin. Sci. 1966. Vol. 21. N 12. P. 1133–1144.
- [6] Shimada T., Akiyama T., Kasai E., Yagi J. // ISIJ International. 2000. Vol. 40. N 10. P. 958–963.
- [7] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
- [8] Мордасов М.М., Савенков А.П., Чечетов К.Е. // Инженерная физика. 2014. № 6. С. 22–29.
- [9] Мордасов М.М., Савенков А.П. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 3. С. 37–45.
- [10] Березовец Г.Т., Дмитриев В.Н., Наджафов Э.М. // Приборостроение. 1957. № 4. С. 11–18.
- [11] Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 424 с.