

## Краткие сообщения

03

### Об уточнении расчетных зависимостей силового действия турбулентной газовой струи

© М.М. Мордасов, А.П. Савенков, К.Е. Чечетов

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

(Поступило в Редакцию 7 июля 2014 г.  
В окончательной редакции 5 марта 2015 г.)

На основании результатов экспериментальных и теоретических исследований скорректированы формулы для расчета силы действия турбулентной газовой струи на преграду. Уточнения позволили упростить известные расчетные формулы и повысить точность определения силы. Приведены результаты исследования величин, влияющих на силовое действие струи, и значения коэффициента формы при ее взаимодействии с различными преградами.

В работе [1] представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие теоретические предположения о величине силы действия турбулентной газовой струи на преграду, основанные на теореме сохранения количества движения. Полученные формулы для определения силового действия струи содержат не проверенные экспериментально выражения и являются сложными. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия турбулентных газовых струй с преградами различной формы позволили уточнить сформулированные предположения и полученные расчетные зависимости.

Для расчета силы  $F$ , с которой газовая струя перпендикулярно действует на преграду, можно использовать одну из формул [1]:

$$F(Q) = \frac{4k\rho_g}{\pi d^2} \frac{Q^2}{\varepsilon_0 + k_Q Q^2}, \quad (1)$$

$$F(P) = \frac{k\pi d^2 \mu^2}{2} \frac{P}{\varepsilon_0 + k_P P}, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент формы преграды,  $\rho_g$  — плотность газа в струе,  $\text{kg/m}^3$ ,  $Q$  — объемный расход газа, вытекающего из отверстия,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $d$  — диаметр отверстия, из которого вытекает струя,  $\text{m}$ ,  $\varepsilon_0$  — коэффициент сжатия струи в отверстии при нулевом расходе газа,  $k_Q = 4.2 \cdot 10^6 \text{ s}^2/\text{m}^6$  и  $k_P = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$  — коэффициенты,  $\mu$  — коэффициент расхода,  $P$  — избыточное давление газа перед отверстием (подразумевается истечение газа в атмосферу),  $\text{Pa}$ .

Формулы (1) и (2) получены исходя из предположения о зависимости коэффициента  $\varepsilon$  сжатия от давления  $P$  перед отверстием. Эта зависимость учитывается выражениями знаменателей формул (1) и (2). В работе [2] представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований зависимости  $\varepsilon(P)$ , свидетельству-

ющие о постоянстве коэффициента  $\varepsilon$ . Для истечения газа из отверстий в тонкой стенке различных диаметров получены значения коэффициента  $\mu$  расхода, среднее арифметическое которых составляет 0.684, что соответствует результатам, приводимым в других источниках [3]. Коэффициент  $\mu$  связан с коэффициентом сжатия через коэффициент поля скоростей  $\varphi_w \approx 0.97$ ,  $\mu = \varphi_w \varepsilon$ . В результате экспериментальных исследований, проведенных по специально разработанной методике [2], установлено, что коэффициент расхода при истечении газа из отверстий диаметрами до 2 мм не зависит от перепада давления. Исследован диапазон от нуля до 30 кПа. Экспериментальные данные укладываются в диапазон чисел Рейнольдса от 1000 до 20 000.

Полученные результаты позволяют упростить формулы (1) и (2). С учетом постоянства коэффициента  $\mu$  расхода получим, что

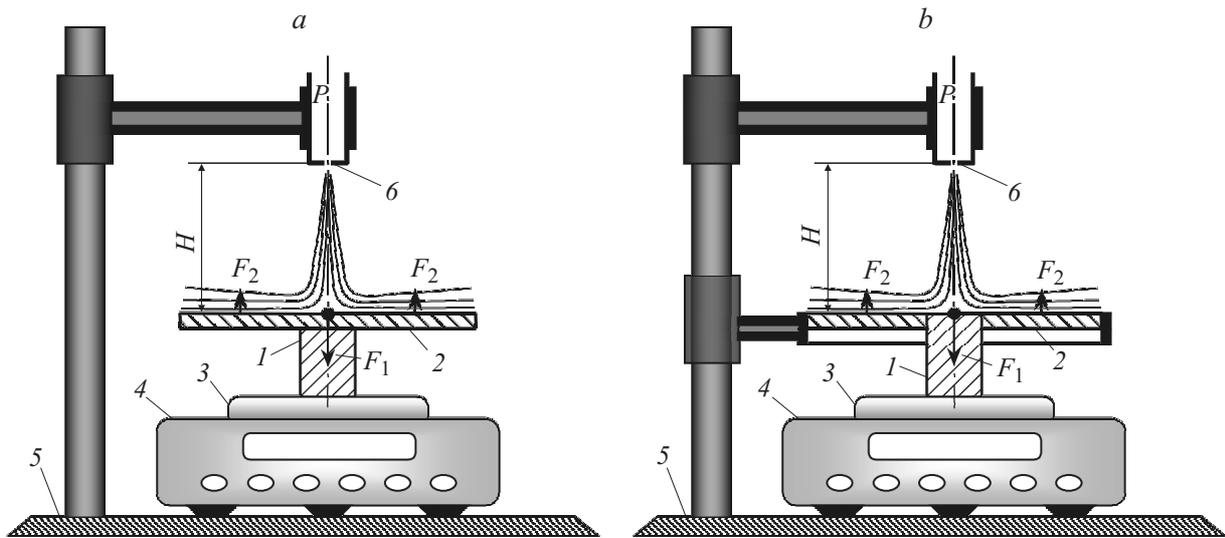
$$F(Q) = k' \frac{4}{\pi d^2 \mu} \rho_g Q^2, \quad (3)$$

$$F(P) = k' \frac{\pi d^2 \mu}{2} P, \quad (4)$$

где  $k' = \varphi_w k$ , а коэффициент  $\mu$  может быть определен экспериментально по методике, изложенной в [2]. Вычисление силы  $F$  по формуле (4) предпочтительнее, чем по формуле (3), так как это обеспечивает более высокую точность за счет исключения влияния плотности  $\rho_g$  газа и его неконтролируемых утечек, а также в связи с меньшей погрешностью средств измерения давления [2].

Зависимости (3) и (4) подвергались экспериментальной проверке на установке, описанной в работе [1], и установке, схема которой изображена на рисунке, а.

В штативе 5 (рисунок, а) установлены лабораторные электронные весы 4 типа Vibra АЖН-420СЕ с абсолют-



Схемы установок для исследования взаимодействия струи газа с преградой.

ной погрешностью не более 0.01 g и струйная трубка с отверстием  $b$  истечения газа диаметром  $d$ . Отверстие  $b$  расположено на расстоянии  $H$  относительно диска  $2$ , соединенного с чашей  $3$  весов  $4$  посредством цилиндра  $1$ . Перед отверстием  $b$  создано избыточное давление  $P$ , контролируемое жидкостным микроманометром (на рисунке не показан). Нулевые показания весов  $4$  соответствуют сумме масс диска  $2$  и цилиндра  $1$ . Турбулентная газовая струя, вытекающая в атмосферу из отверстия  $b$  под действием перепада давления величиной  $P$ , взаимодействуя с поверхностью диска  $2$ , оказывает на него силовое воздействие величиной  $F$ , передаваемое через цилиндр  $1$  чувствительному элементу весов  $4$ . Для определения величины силы  $F$  показания весов  $4$  умножают на ускорение  $g$  свободного падения. Диск  $1$  и цилиндр  $2$  образуют плоскую преграду без ограничения течения газа по краям. Воздействие газовой струи непосредственно на чашу  $3$  весов  $4$  приводит к обтеканию газовым потоком этих объектов и искажению результата измерения в результате соответствующего изменения направления вектора количества движения.

Проведены экспериментальные исследования при изменении диаметра  $d$  в диапазоне 0.89–2.0 mm, площади преграды — 0.006–0.05 m<sup>2</sup>, расстояния  $H$  — 0.2–400 mm, давления  $P$  — 0.3–30 kPa.

Результаты исследований позволяют утверждать, что:

— формулы (3) и (4) адекватно описывают зависимость силы действия газовой струи от влияющих величин,

— силовое действие струи распространяется на расстояние, превышающее 500 диаметров отверстия, из которого она вытекает,

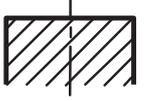
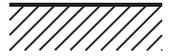
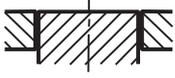
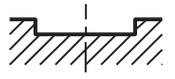
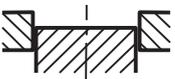
— сила  $F$  изменяется не более чем на 10% относительно среднего значения при изменении расстояния  $H$  между отверстием истечения и преградой от 3 до 400 mm.

Коэффициент  $k'$  определяется формой поверхности, с которой взаимодействует струя, и зависит от изменения вектора количества движения при взаимодействии. Можно предположить, что в случае выпуклой поверхности  $k' < 1$ , для плоскости  $k' \approx 1$ , а для вогнутой поверхности  $1 < k' < 2$  [1]. В ходе экспериментальных исследований на установке по схеме рисунка,  $a$ , были получены значения коэффициента  $k'$  для плоскости в диапазоне от 0.9 до 1.2, среднее арифметическое составило 1.04. Для вогнутых поверхностей различной формы с использованием установки, схема которой описана в работе [1], получены значения  $k'$  в диапазоне от 1.33 до 1.44, среднее арифметическое — 1.37 [4].

В результате анализа ряда экспериментальных исследований было установлено, что максимальное силовое действие турбулентной газовой струи на плоскую преграду наблюдается в том случае, когда площадь преграды ограничивается областью, на которой происходит изменение направления вектора количества движения газа. Если площадь преграды превышает размеры этой области, то силовое действие струи становится меньшим максимального. Это можно объяснить следующим образом.

Действие струи на преграду проявляется двояко. У центральной части преграды происходит изменение направления вектора количества движения газа, в результате чего направление силы  $F_1$ , действующей на эту часть, совпадает с исходным направлением вектора количества движения (см. рисунок). У периферийной части преграды газовые потоки протекают параллельно ее поверхности, формируя силу  $F_2$ , противоположную по направлению силе  $F_1$ . Поэтому, в схеме на рисунке,  $a$ , на чувствительный элемент весов  $4$  без учета веса цилиндра  $1$  и диска  $2$  действует результирующая сила  $F = F_1 - F_2$ .

Результаты экспериментального определения коэффициента  $k'$ 

Номер и форма преграды	Описание	Высота, $h$ , mm	Коэффициент $k'$
1 	Цилиндр	0	0.57
2 	Плоскость	0	1.08
3 	Цилиндр и диск	0	1.00
4 	Углубление	2.0	1.24
5 	Цилиндр и диск	2.0	1.33
6 	Углубление	4.0	1.17
7 	Цилиндр и диск	4.0	1.27
8 	Цилиндр с углублением	3.5	1.29
9 	Углубление	3.8	1.05
10 	Цилиндр и диск	3.8	1.41
11 	То же	5.0	1.31
12 	То же	6.5	1.27

Наличие силы  $F_2$  обуславливает зависимости коэффициента  $k'$  [4]:

— от расстояния  $H$  до преграды из-за изменения соотношения площадей ее поверхности, на которых действуют силы  $F_1$  и  $F_2$ ,

— от диаметра  $d$  отверстия из-за изменения соотношения сил  $F_1$  и  $F_2$  в результате изменения скорости газовых потоков на периферии преграды.

В связи с наличием двух составляющих результирующей силы  $F$  интересно определить коэффициент  $k'$ , обусловленный только изменением количества движения газа. Для экспериментального определения этого коэф-

фициента была собрана установка, схема которой изображена на рисунке, *b*. Отличие этой установки заключается только в том, что вместо диска 2 (см. рисунок, *a*) используется кольцо 2 (см. рисунок, *b*), закрепленное в штативе 5. Детали 1 и 2 собраны с зазором, обеспечивающим их свободное взаимное перемещение без трения (см. рисунок, *b*). Кроме того, для исследования взаимодействия струи газа с поверхностями сложной формы в экспериментах использованы цилиндр с углублением в основании и диски с углублениями различных форм.

В таблице представлены результаты экспериментального определения коэффициента  $k'$  для преград различ-

ной формы. Эксперименты с преградами №№ 1, 2, 4, 6, 8, 9 проведены на установке по схеме рисунка, *a*, №№ 3, 5, 7, 10, 11, 12 — по схеме рисунка, *b*. В ходе экспериментов использованы: диафрагма с отверстием истечения диаметром 1.41 mm, диски с углублениями (№№ 4, 6, 9) и кольцо 2 внешним диаметром 50 mm (№№ 3, 5, 7, 10, 11, 12), цилиндры 1 диаметром 13 mm с плоским основанием (№№ 1, 3, 5, 7) и с углублением в основании (№№ 8, 10, 11, 12). Расстояние  $H$  до преграды было постоянным и равным 30 mm, давление  $P$  варьировало на четырех уровнях: 490, 980, 1460, 1950 Pa. Значения коэффициента  $k'$  при различных давлениях отличаются друг от друга не более чем на 5%. Относительная погрешность измерения не превышает 3%. В таблице приведены средние арифметические значения коэффициента  $k'$  для всех давлений. Высота  $h$  углубления представляет собой вертикальное расстояние между верхней и нижней точками преграды.

Диаметр свободной струи на расстоянии  $H$  от отверстия составляет  $\sim 13$  mm, что соответствует диаметру цилиндра 1 (см. рисунок, *b*). Площадь взаимодействия струи с преградой, на которой происходят изменения количества движения, превышает площадь основания цилиндра, поэтому для плоской поверхности силовое действие на ограниченную поверхность (преграда № 3 в таблице) меньше, чем на полную (преграда № 2). Значение коэффициента  $k' > 1$  можно объяснить тем, что при взаимодействии с преградой газовые потоки изменяют свое направление на угол, больший  $90^\circ$ , при котором  $k' \approx 1$ . Минимальное значение коэффициента  $k'$  получено при взаимодействии с преградой № 1, где потоки газа отклоняются на угол, значительно меньший  $90^\circ$ . Если площадь взаимодействия струи и преграды ограничивается углублением, то силовое действие на дно углубления оказывается большим, чем на всю поверхность преграды (см. №№ 4–12). Наибольшие различия характерны для преград №№ 9, 10. Это связано с тем, что газовые потоки, выходящие из углубления № 9 не устремляются вверх, а растекаются по поверхности преграды. Сила  $F_2$  сравнительно велика, так как формируется не только за счет потоков, протекающих параллельно поверхности преграды, но и за счет изменения количества движения газа на краях углубления. Существенная разница в значении коэффициента  $k'$  для преград №№ 9, 10 доказывает значимость влияния второй составляющей  $F_2$  на результирующую силу  $F$  действия газовой струи.

В ходе экспериментов с изменением расстояния  $H$  от отверстия истечения до преграды были получены значения коэффициента  $k'$  до 1.8, что довольно близко к верхнему теоретическому пределу, равному 2. Такие высокие значения были получены при малых значениях  $H$ , когда потоки, втекающие в углубление и вытекающие из него, слабо взаимодействуют между собой.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при исследовании газожидкостных систем в различных отраслях промышленности: металлургии [5,6],

авиации и космонавтике [7], химической технологии [8], при исследовании тонких поверхностных пленок, например пленок Ленгмюра–Блоджетт [9], и в измерительной технике [10,11]. Анализ работ [5–10] показывает, что их авторы уделяют недостаточное внимание определению соответствия между изменением вектора количества движения газа и формированием силы, действующей на поверхность жидкости.

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

## Список литературы

- [1] Мордасов М.М., Савенков А.П. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 3. С. 37–45.
- [2] Мордасов М.М., Савенков А.П., Четов К.Е. // Инженерная физика. 2014. № 1. С. 13–18.
- [3] Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 508 с.
- [4] Мордасов М.М., Савенков А.П., Четов К.Е. // Инженерная физика. 2014. № 6. С. 22–29.
- [5] Hwang H.Y., Irons G.A. // Metallurgical and Materials Transactions B. 2012. Vol. 43. P. 302–315. DOI: 10.1007/s11663-011-9613-3.
- [6] Ersson M., Tillander A., Jonsson L., Jonsson P. // ISIJ International. 2008. Vol. 48. N 4. P. 377–384. DOI: 10.2355/isijinternational.48.377.
- [7] Labus T.L., Aydelott J.C. Gas-jet impingement normal to a liquid surface: NASA technical note TN D-6368. Washington, D. C.: NASA, 1971. 16 p.
- [8] Bradshaw A.V., Chatterjee A. // Chem. Eng. Sci. 1971. Vol. 26. N 6-B. P. 767–772. DOI: 10.1016/0009-2509(71)83038-5.
- [9] Berendsen C.W.J., Zeegers J.C.H., Kruis G.C.F.L., Riepen M., Darhuber A.A. // Langmuir. 2012. Vol. 28. P. 9977–9985. DOI: 10.1021/la301353f.
- [10] Pfund A.H., Greenfield E.W. // Ind. Eng. Chem. 1936. Vol. 8. N 2. P. 81–82. DOI: 10.1021/ac50100a001.
- [11] Мордасов М.М., Мордасов Д.М., Савенков А.П. Аэрогидродинамические эффекты в бесконтактных струйных методах неразрушающего контроля вязкости жидких веществ. М.: Физматлит, 2012. 352 с.