

03

Особенности распространения осесимметричной струи в трубе с проницаемой стенкой и закрытыми торцами

© А.Н. Бажайкин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
E-mail: bazhan@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 7 июня 2012 г.

Экспериментально исследованы эффекты, сопровождающие распространение высоконапорной осесимметричной газовой струи в трубе с проницаемыми стенками и закрытыми торцами. Получены картины дымовизуализации течений снаружи трубы, поля статических давлений вдоль трубы и распределения концентраций материала струи вдоль наружной и внутренней стенок трубы в зависимости от условий впрыска струи. Предложена схема течений сред внутри, снаружи и через стенки проницаемой трубы, в которой предполагается совмещение функций в виде струйного эжектора-смесителя во внутреннем пространстве и горелочного устройства на наружной стенке.

Распространение осесимметричной газовой струи в воздушной среде, ограниченной стенками канала (трубы), вызывает появление градиентов давления в пространстве вокруг струи, образование зон обратных течений (рециркуляция), увеличение (эжекция) спутной среды внутрь канала с последующим смещением потоков. Данные эффекты экспериментально исследовались ранее для случая движения струи в открытой с двух сторон трубе с непроницаемыми стенками [1], где были изучены поля давлений по длине струи, границы и размеры зон рециркуляции, профили скоростей и концентраций газовых сред. На основании полученных результатов даны качественная картина течений и количественные зависимости локализации рециркуляционных зон.

В настоящее время разработаны технологии получения новых проницаемых пористых и жаропрочных материалов [2], изделия из которых используются для создания радиационных (беспламенных) горелочных

устройств [3], обладающих рядом преимуществ перед существующими пламенными горелками. Для эффективной и безопасной работы таких устройств необходима разработка новых схем организации процесса.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований эффектов, сопровождающих распространение высоконапорной газовой струи в закрытой с обоих торцов трубе с проницаемыми стенками. Комплексная диагностика включала измерение статических давлений по длине трубы, определение концентраций материала струи вдоль трубы и визуализация течений около трубы с помощью дыма. При определении статических давлений и визуализации течений в трубу впрыскивался воздух, а при измерениях концентраций использовался углекислый газ (имитирующий по плотности пропан), удобный для газового анализа смеси.

Схема постановки экспериментов представлена на рис. 1, *a*. Впрыск газа (воздуха) производился из сопла 1 в трубу 2 длиной 500 мм, диаметром 48 мм и толщиной стенки 10 мм. Труба изготовлена методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) из интерметаллидов системы NiAl с размером транспортных пор 0.1–0.5 мм, обеспечивающих достаточную проницаемость для газов через ее стенку. Образующаяся при впрыске струя 3 конической формы вызывает изменение в окружающем ее пространстве статических давлений (Δp), которые измерялись с помощью тонкой трубки 4 с закрытым торцом и отверстием сбоку (аналог трубки Пито), соединенной с датчиком давления „Агава“ 5, сигнал с которого подавался на компьютер 6. При измерениях трубка 4 перемещалась в осевом направлении вдоль стенки трубы 2 по всей ее длине. Аналогично, с помощью этой же трубки 4, соединенной с газоанализатором 7 „Тест“, определялись поля концентраций CO₂ в смеси с воздухом. Визуализация течений дымом производилась с помощью нагреваемой электричеством нихромовой проволоки 8, смоченной трансформаторным маслом. Проволока растягивалась над трубой 2 по всей ее длине.

В экспериментах изменялись давления впрыска P газа (0.85–3 atm), диаметр отверстия сопла d (0.4–0.6 mm) и расстояния от среза трубы до сопла 1 (6–206 mm).

Дымовизуализация процесса показала интересную качественную картину течений снаружи проницаемой трубы (рис. 1, *b, c*): в начальной части со стороны сопла происходит всасывание струек дыма внутрь трубы, в остальной части трубы дым, наоборот, отбрасывается в сторону

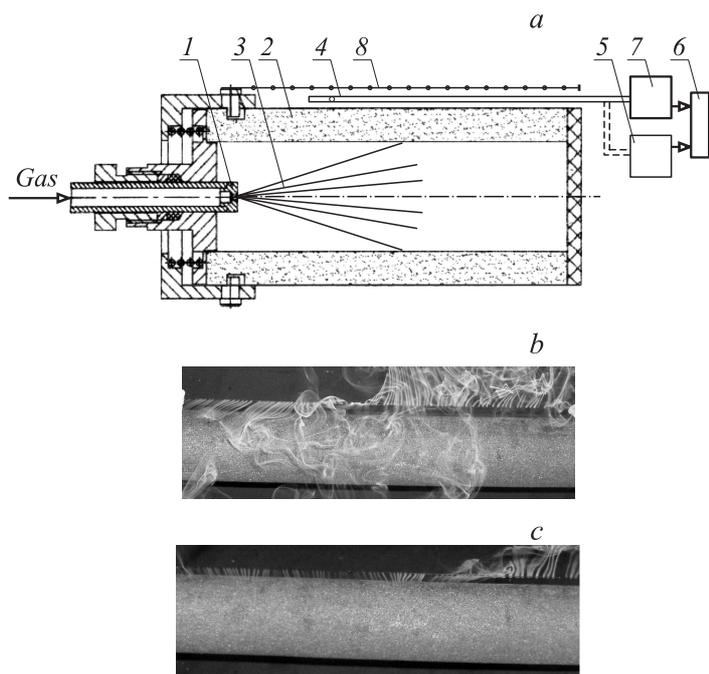


Рис. 1. Схема постановки экспериментов (а) и результаты визуализации дымом (b, c).

выходящим через стенку трубы воздухом. Между этими участками имеется переходная зона, где дым не всасывается и не отбрасывается, причем положение этой зоны зависит от l : чем глубже сопло в трубе, тем дальше зона от начала трубы (на рис. 1, b — $l = 56$ mm, на рис. 1, c — $l = 156$ mm). Таким образом, движение струи внутри пронцаемой трубы вызывает эжекцию окружающего воздуха внутрь на начальном участке и истечение среды наружу на остальном участке. Экспериментальные значения статических давлений, измеренные снаружи пронцаемой трубы, показаны на рис. 2, a. Условия проведения экспериментов представлены в таблице.

Все 5 представленных режимов имеют одинаковые особенности: на начальном участке трубы статические давления около наружной стенки

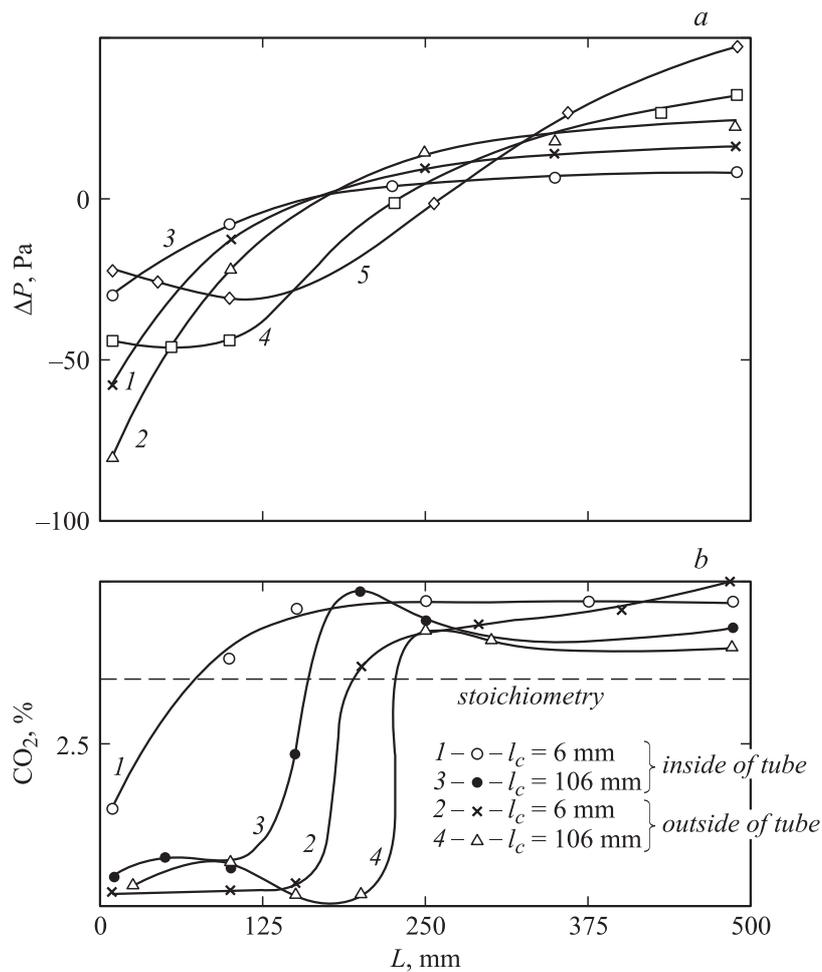


Рис. 2. Профили статических давлений (a) и концентраций CO_2 (b) по длине пронизаемой трубы.

имеют отрицательные (относительно атмосферного давления) значения, что является причиной всасывания окружающей среды внутрь трубы. По мере удаления от начала трубы значения Δp возрастают до нуля

Обозначения режимов	P , atm	d , mm	l , mm
1 — x	3	0.4	6
2 — Δ	3	0.6	6
3 — \circ	1	0.6	6
4 — \square	3	0.6	56
5 — \diamond	3	0.6	106

и выше, обозначая зону истечения из трубы до ее конца. Влияние диаметра сопла видно из сравнения кривых 1 и 2 (0.4 и 0.6 mm): увеличение d приводит к большему разрежению среды на начальном участке (эжектирующей способности струи) и большим значениям ΔP на остальном участке. Влияние давления впрыска наблюдается из сравнения кривых 2 и 3: с ростом P (с 1 до 3 atm) увеличивается эжекция среды и соответственно интенсивность истечения смеси из трубы. Перечисленные режимы проводились при $l = 6$ mm, когда сопло было в начале трубы; при этом длина зоны эжекции до $\Delta P = 0$ была одинаковой — 145 mm (рис. 2, *a*) и составляла 5 калибров трубы. Влияние l видно из сравнения кривых 2, 4 и 5, полученных при одинаковых $d = 0.6$ mm и $P = 3$ atm, но разных l . При движении сопла в трубу на 56 mm вид кривой $\Delta P(L)$ качественно изменяется, зона эжекции увеличивается, а кривая давления 4 более пологая, чем кривая 2. Большее заглубление сопла $l = 106$ mm (кривая 5) еще больше удлиняет зону эжекции, увеличивает площадь всасывания и количество эжектируемого воздуха, который частично компенсирует разрежение в трубе. Поэтому монотонный вид кривой 2 сменяется более сложным у кривых 4 и 5. Таким образом, изменением d , P и l можно управлять давлением и площадью всасывания среды в проницаемую трубу и соответственно интенсивностью и площадью истечения газовой смеси из трубы. Применительно к приложению данных исследований — разработке струйного смесителя для горелки при впрыске топливной струи (например, пропана) — проведены эксперименты с впрыском углекислого газа, который имеет одинаковую с пропаном плотность и безопасен в обращении. На рис. 2, *b* приведены результаты измерений концентраций CO_2 внутри и снаружи трубы, которые показывают, что

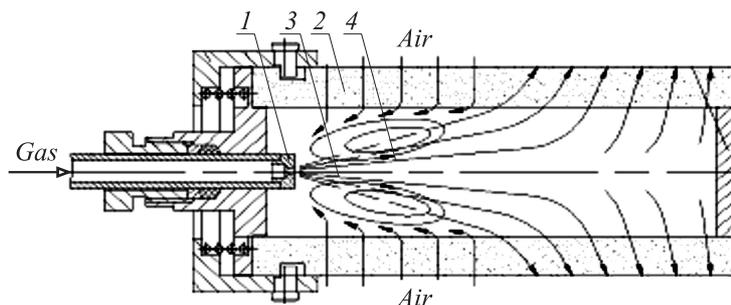


Рис. 3. Схема течений, вызываемых струей газа.

внутри трубы в зоне эжекции концентрации CO_2 резко различаются в разы (кривые 1 и 3) до порядка, обозначая зону неустойчивого течения и смешения двух сред, называемую зоной рециркуляции в [1]. Кривые 2 и 4 иллюстрируют состав смеси снаружи (соответствующий кривым 1 и 3 внутри). На начальном участке концентрации CO_2 незначительны, поскольку газ практически не выходит наружу из-за разрежения в трубе. Далее после зоны эжекции концентрации CO_2 резко возрастают и стабилизируются около уровня, соответствующего стехиометрическому составу пропановоздушной смеси (штриховая линия на рис. 2, b). Эти данные показывают, что на поверхности трубы достижимы благоприятные условия для горения данной смеси.

Описанные результаты с учетом данных, полученных в [1], дают возможность предположить следующую схему течений сред внутри, снаружи и сквозь стенку пористой трубы с закрытыми торцами, изображенную на рис. 3.

При впрыске газа из сопла 1 в трубу 2 образующаяся струя 3 вызывает появление градиентов давлений в продольном и поперечном направлениях, под действием которых происходит движение окружающей среды: на начальном участке наружный воздух проходит сквозь стенку трубы внутрь (эжекция), где увлекается в движение вниз по потоку. Струя, достигнув внутренней стенки трубы, резко тормозится, вызывая появление положительного градиента давления с образованием возвратного течения и формированием зоны рециркуляции 4, где происходит смешение материала струи и эжектируемой среды. После

этого смесь выдавливается сквозь стенку трубы наружу повышенным давлением (относительно атмосферного) в участках трубы ниже зоны рециркуляции. Данная схема допускает регулировку размеров зон рециркуляции, эжекции и истечения, а также состава смеси путем изменения условий впрыска струи и является основанием для разработки струйного смесителя для осуществления горения на поверхности пористого материала, которое реализуется в радиационных горелках. В отличие от существующих горелок, работающих на заранее подготовленных горючих смесях в специальных смесителях, в описываемом устройстве смесь приготавливается непосредственно внутри горелки, что обеспечивает безопасность от такого явления, как проскок пламени в смеситель.

Список литературы

- [1] Бакалдина Л.А., Сидоров И.В. // Известия Сибирского отделения АН СССР. 1970. № 8. В. 2. С. 37–44.
- [2] Maksimov Y.M., Kirdyashkin A.I., Baev V.K., Gushin A.N. // Advances in Science and Technology. 2010. V. 63. P. 297–301.
- [3] Кирдяшкин А.И., Орловский В.М., Соснин Э.Л., Тарасенко В.Ф., Гуцин А.Н. // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 5. С. 37–41.