

03

Особенности взаимодействия осесимметричной газовой струи с преградой из высокопроницаемого материала

© В.К. Баев, А.Н. Бажайкин[¶]

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

Поступило в Редакцию 25 октября 2016 г.

Комплексная диагностика (теневая съемка, дымовизуализация, газовый анализ) показала, что при натекании струи углекислого газа на проницаемую пористую преграду образуются течения по поверхности, внутри и позади преграды, а также течение, циркулирующее между соплом и преградой. Представлены пространственное распределение концентраций CO_2 и схема течений при взаимодействии струи с преградой.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.05.44364.16541

Исследование характеристик течения при взаимодействии струи с преградой необходимо для развития ресурсосберегающих технологий, связанных с энергетикой, теплообменными процессами, нанесением различных покрытий и другими применениями. Относительно небольшие затраты на струйную обдувку преград, значительная интенсификация теплообмена и полезные эффекты, связанные с перестройкой и турбулизацией течений вблизи преграды, стимулировали множество исследований. В работе [1] дана схема течений при соударении струи с непроницаемой преградой, состоящая из зоны свободной струи, зоны разворота и течения, стелющегося по преграде. Приведены экспериментальные данные и расчеты параметров течений в этих зонах, а также проанализированы условия отрыва потока от преграды и обратного течения струи. В [2] описаны экспериментальные исследования локальных характеристик турбулентности, касательных напряжений и давлений на преграде в зависимости от условий взаимодействия струи с преградой.

В [3] проведено численное моделирование вихревой структуры течения и теплообмена в области взаимодействия с преградой и разворота потока.

К настоящему времени разработаны технологии получения новых проницаемых пористых материалов с высокими значениями пористости, удельной поверхности, проницаемости, теплообменных характеристик [4]. Данные свойства существенно расширяют области применения струйных технологий, что требует изучения течений, возникающих при взаимодействии струй с проницаемыми преградами. При натекании струи на проницаемую преграду газ растекается как по поверхности (как на непроницаемой преграде), так и внутри преграды и часть газа проходит через преграду. Структура таких сложных течений остается малоизученной. В [5] описаны исследования взаимодействия сверхзвуковой воздушной струи с проницаемой преградой. Использовались теневая съемка процесса, измерения статических давлений на преграде и численный расчет течений с использованием программного пакета Fluent. В результате измерений и расчетов построены схемы течений на поверхности, внутри и сзади проницаемой преграды. Согласно схемам, в приосевой зоне перед преградой образуется отрывная зона, имеющая форму вихря, которая огибается основным потоком с формированием зоны разворота на 90° , после которой поток растекается по преграде. Другая часть потока растекается внутри преграды с последующим выходом либо на лицевую ее сторону в растекающийся по ней поток, либо на обратную сторону преграды, образуя течение за преградой.

Следует отметить, что схемы и параметры течений могут существенно меняться в зависимости от скорости и свойств натекающего газа и преграды, расстояния от сопла до преграды, наличия иных ограждающих поверхностей и условий, соответствующих целям исследований. Поэтому необходимо дальнейшее и всестороннее изучение такого сложного и нестационарного процесса, как натекание струи на проницаемую преграду.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия струи углекислого газа (CO_2) с расположенной перпендикулярно ее оси преградой из высокопроницаемого ячеисто-пористого материала (ВПЯМ) согласно схеме, представленной на рис. 1, а. Струя впрыскивалась из цилиндрического сопла 1 диаметром 0.5 mm, под давлением 0.1–1 atm на преграду 2 на расстоянии $l_c = 50–100$ mm. Углекислый газ подавался на сопло из баллона 3 через

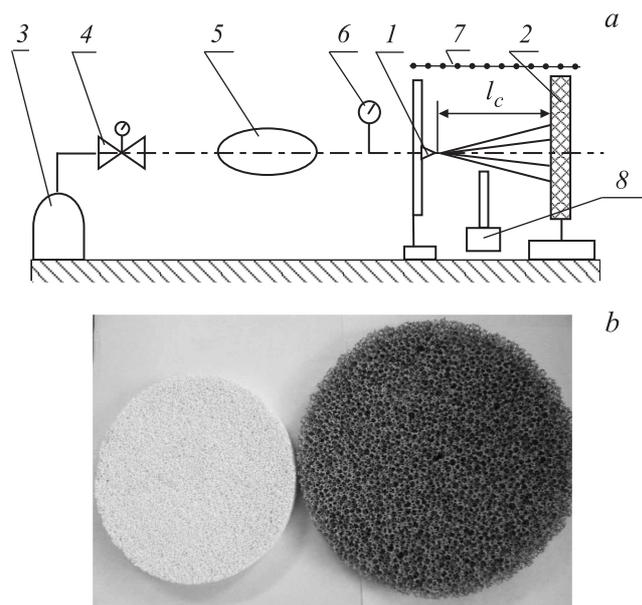


Рис. 1. *a* — схема постановки экспериментов, *b* — изображение проницаемых дисков-преград из керамики и никеля.

редуктор 4, счетчик расхода газа (ГСБ-4) 5, с контролем давления впрыска образцовым манометром 6.

Диагностика процесса включала видеосъемку через теневой прибор ИАБ-451, визуализацию течений с помощью дыма от нагретой током нихромовой проволоки 7, смазанной маслом, и газовый анализ среды с помощью капиллярной трубки 8, соединенной с газоанализатором „Тест“ 9.

В качестве преград использовались диски из ВПЯМ керамики и никеля, показанные на рис. 1, *b*, толщиной 20 мм, диаметром 150–200 мм, имеющие пористость (*Por*) 83–96%, размер пор-ячеек (d_p) 10–30 μm и проницаемость $0.8\text{--}5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ [4].

В результате экспериментов получены результаты при различных условиях впрыска и свойствах преград, которые влияют на картину процесса. На рис. 2, *a* представлено теневое изображение натекания

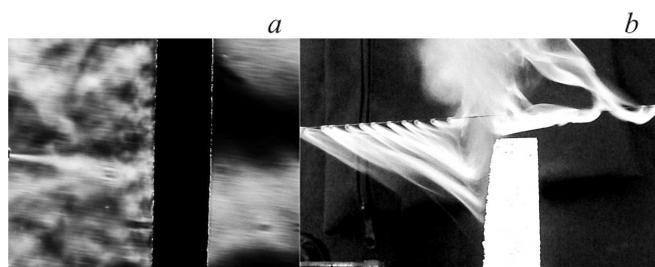


Рис. 2. *a* — теневое изображение взаимодействия струи CO_2 с пористой преградой, *b* — визуализация течений с помощью дыма.

струи CO_2 , впрыснутой под давлением $P = 0.8 \text{ atm}$ (скорость впрыска $U_0 = 270 \text{ m/s}$, расход газа $G = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$), на преграду из никелевого ВПЯМ ($Por = 95\%$, $d_p = 20 \text{ \mu m}$) при $l_c = 50 \text{ mm}$. Между соплом и преградой наблюдается неоднородная картина, на фоне которой просматриваются образования в виде колец вокруг струи. Анализ видеogramм показал, что от преграды постоянно отходят волны возвратных течений (в сторону сопла), в совокупности образующих кольцевой вихрь тороидальной формы с центром в приосевой зоне струи. Течение за преградой, наоборот, спокойное, однородное, „просеянное“ через поры и ячейки и по форме представляет конус, переходящий в цилиндр. При малых давлениях впрыска $P < 0.2 \text{ atm}$ ($U_0 < 140 \text{ m/s}$ и $G < 0.05 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$) подобной картины не наблюдается: струя стелется по преграде и возвратных течений не образуется.

Картина визуализации течений с помощью струек дыма, полученная при впрыске CO_2 в аналогичных условиях (рис. 2, *a*), показана на рис. 2, *b*, где сопло расположено слева внизу. Струйки дыма между соплом и преградой визуализируют линии тока, эжектируемого струей воздуха [6], и направлены к оси струи, но не доходят до оси и резко обрываются, как бы огибая тело сферической формы, которым, вероятно, является кольцевой вихрь. За 5–10 мм до преграды траектории струек резко разворачиваются радиально от оси струи и сливаются в общий поток, стелющийся по преграде, за пределами которой поток расширяется и „притягивает“ струйки, образовавшиеся позади преграды. Дымовизуализация дополняет данные теневой видеосъемки о структуре течений струи и окружающего ее воздуха в области

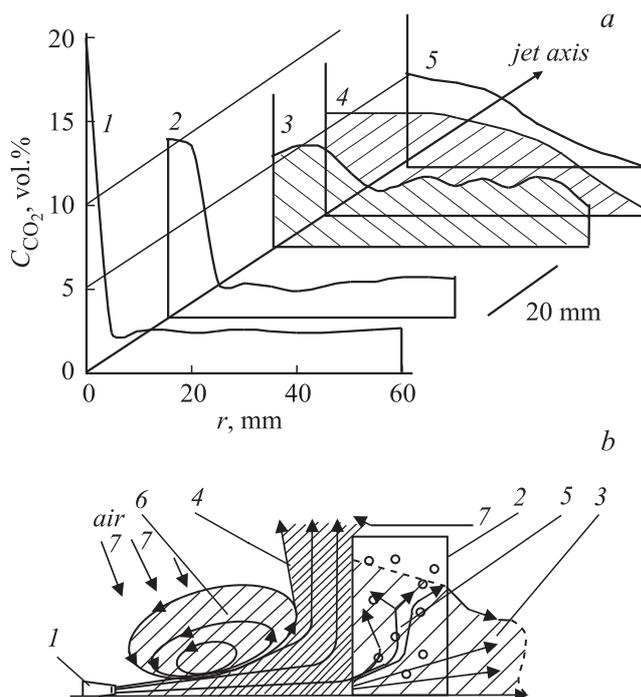


Рис. 3. *a* — распределение концентраций CO₂ при натекании струи на преграду, *b* — схема течений: 1 — сопло, 2 — преграда, 3 — запреградное течение, 4 — растекание перед преградой, 5 — растекание внутри преграды, 6 — тороидальный вихрь, 7 — эжекция воздуха.

ламинарных течений, где не происходит разрушение визуализирующих струек турбулентностью.

Количественную информацию о составе образующейся смеси CO₂ с воздухом позволил получить газовый анализ. Отбор проб смеси производился с помощью капиллярной трубки 8 вдоль радиуса сечений, перпендикулярных оси струи на разных расстояниях от сопла, в том числе на лицевой и тыльной поверхностях преграды. На рис. 3, *a* показана 3-мерная картина распределения концентрации CO₂ (C_{CO₂}) по длине струи в сечениях радиусом 60 мм, полученная при условиях,

аналогичных теневой съемке. У среза сопла (кривая 1) наблюдается резкий пик CO_2 на оси струи (в ее ядре), переходящий в плато с концентрациями в 2–3%. В сечении через 20 мм от сопла (кривая 2) максимум концентрации CO_2 на оси значительно уменьшается, а значения C_{CO_2} на плато практически не изменяются, так же как и в последующих сечениях до преграды (на рис. 3, а не показаны). Полученные результаты показывают, что углекислый газ имеется не только в ядре и в зоне смешения струи, но и в области, значительно превышающей радиус струи в данных сечениях. Поэтому можно предположить наличие CO_2 (разбавленного эжектированным струей воздухом) в этой области в результате возвратного течения газа (рециркуляции) от преграды в сторону сопла с последующим движением к преграде спутно струе. Полученные результаты и сделанные предположения имеют важное значение как в описании структуры течений, так и в практических применениях, например в вопросах горения (CO_2 по плотности близок к пропан-бутану). На преграде (кривая 3 заштрихована) наблюдается неоднородная картина с четко выраженными минимумами–максимумами и резкими колебаниями C_{CO_2} в точках измерений (на кривых приведены усредненные значения C_{CO_2}), свидетельствующими о существенной турбулизации течений. На тыльной стороне преграды (кривая 4) все неоднородности сглаживаются и C_{CO_2} с постоянного максимального значения в приосевой зоне струи плавно снижается к периферии. В сечениях, удаленных от преграды (кривая 5), C_{CO_2} также плавно снижается от оси к краю течения и размеры струи за преградой сокращаются.

Таким образом, комплексная диагностика показала, что из струи, натекающей на проницаемую пористую преграду, образуется несколько частей — потоков. Одна часть проходит преграду насквозь с последующим движением в осевом направлении. Другая часть растекается по лицевой поверхности преграды и выходит за ее пределы. Часть струи растекается внутри преграды с последующим выходом либо на переднюю поверхность преграды и сливается с растекающимся потоком, либо на заднюю поверхность, соединяясь с запреградной струей. Часть растекающегося перед преградой потока ответвляется от последнего и образует возвратное течение, циркулирующее между соплом и преградой и обратно в виде тороидального вихря. При этом в зону циркуляции эжектируется окружающий воздух с образованием газозвушной смеси определенного состава.

На основании полученных результатов и литературных данных представляется схема течений, показанная на рис. 3, *b*. Течения, изображенные на схеме, наблюдались практически на всех режимах проведенных экспериментов (кроме $P < 0.2 \text{ atm}$), обозначенных выше. Анализ результатов показал, что с повышением скорости соударения струи с преградой и снижением l_c увеличиваются площадь контакта струи с преградой и диаметр запреградного потока, уровень концентраций CO_2 . С ростом проницаемости преграды увеличивается уровень C_{CO_2} в потоке за преградой и соответственно снижается в течениях перед преградой. В зависимости от цели практического применения описываемого процесса, изменением условий взаимодействия струи с преградой можно управлять структурой, интенсивностью и другими характеристиками течений.

Список литературы

- [1] *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. С. 716.
- [2] *Алексеев С.В., Кулебякин В.В., Маркович Д.М.* и др. // ИФЖ. 1996. Т. 69. № 4. С. 615–624.
- [3] *Волков К.Н.* // ПМТФ. 2007. Т. 48. № 1. С. 55–67.
- [4] *Анциферов В.Н., Храмов В.Д.* // Перспективные материалы. 2000. № 5. С. 56–60.
- [5] *Запрягаев В.И., Кавун И.Н., Солотчин А.В.* // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 3. С. 73–81.
- [6] *Бажайкин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 21. С. 41–47.