

03

## Взаимодействие газовой струи с неподвижной и вращающейся преградой из высокопроницаемого пористого материала

© В.К. Баев, А.Н. Бажайкин<sup>¶</sup>

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>¶</sup> e-mail: bazhan@itam.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2017 г.)

Экспериментально исследовано взаимодействие осесимметричной струи углекислого газа с неподвижной и вращающейся проницаемой для газов преградой. Описаны картины течений и пространственные распределения концентраций  $\text{CO}_2$  в зависимости от условий экспериментов. Рассмотрена возможность использования полученных результатов для организации различных физико-химических процессов.

DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46624.2598

### Введение

Исследование характеристик течений 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 взаимодействии 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 результаты экспериментов и численных расчетов взаимодействия сверхзвуковой воздушной струи и проницаемой преграды, на основании которых представ-

лены схемы течений. Согласно схемам, в приосевой зоне перед преградой образуется отрывная зона, имеющая форму вихря, которая огибается основным потоком с формированием зоны разворота на  $90^\circ$ , 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 выходит на обратную сторону преграды, образуя течение за преградой. Особенности взаимодействия дозвуковой струи  $\text{CO}_2$  с высокопроницаемой пористой преградой из никеля (пористость 95%) кратко изложены в [6], где дана схема течений по поверхности, внутри и позади преграды, а также циркуляционного течения между соплом и преградой. Представляет практический интерес взаимодействие струи с вращающейся проницаемой преградой — диском, обладающим способностью всасывать торцевыми поверхностями газообразные среды, которые внутри диска перемещаются в радиальном направлении и выбрасываются через цилиндрическую поверхность диска [7], т.е. диск может использоваться в качестве элемента вентилятора. Если одновременно подавать к вращающемуся диску среды, имеющие различные свойства, внутри диска могут осуществляться такие процессы, как смешение, теплообмен, массообмен и химические реакции, т.е. проницаемый диск может быть использован в качестве реактора и вентилятора, перемещающего продукты реакций для дальнейшего применения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований распространения струи углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) в воздухе и взаимодействия ее с неподвижной и вращающейся преградой (диск) из высокопроницаемого ячеисто-пористого материала (ВПЯМ).

### Условия и методика проведения экспериментов

Схема экспериментов представлена на рис. 1, а. Струя вприскивалась из цилиндрического сопла  $I$  диамет-

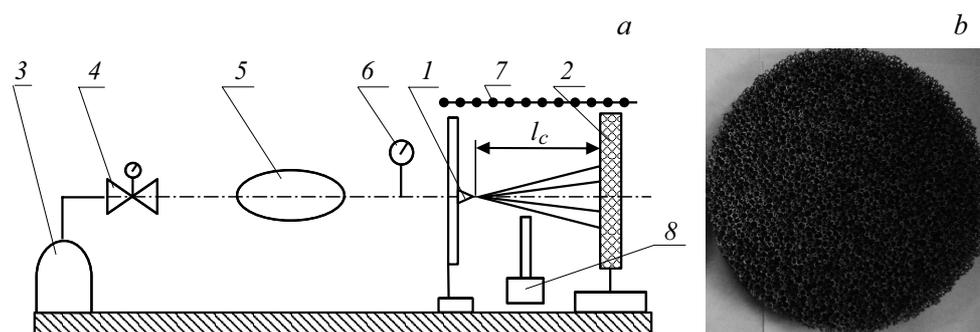


Рис. 1. *a* — схема постановки экспериментов. *b* — изображение высокопроницаемой преграды — диска из никелевого ВПЯМ.

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

В качестве преграды использовался диск из никелевого ВПЯМ, показанный на рис. 1, *b*, толщиной 20 mm, диаметром 150 mm, имеющий пористость 95%, размер пор-ячеек 2–4 mm и проницаемость  $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$  [4].

Диагностика процесса включала теньевую видеосъемку, визуализацию течений с помощью дыма и газовый анализ среды с помощью капиллярной трубки 8, соединенной с газоанализатором „Тест“ 9.

Видеосъемка процесса проводилась через теньевой прибор ИАБ-451, установленный перпендикулярно оси струи так, чтобы в поле зрения прибора (240 mm) попадало сопло, диск и пространство за диском. Четкость изображения струи и течений достигалась за счет разницы плотностей впрыскиваемого  $\text{CO}_2$  и окружающего воздуха при положении ножа Фуко, параллельном оптической щели прибора. При этом кромка ножа регулировалась совпадающей с осью струи так, что половина изображения (относительно оси струи) получалась светлой, а другая половина — темной. Съемка производилась со скоростью 24 кадра в секунду.

Визуализация течений с помощью дыма осуществлялась с помощью нихромовой проволоки 7, смоченной машинным маслом и установленной над соплом, струей и преградой. При нагреве проволоки током масло собиралось на ней в капли, которые испарялись в виде струек дыма, реагирующих на перепады давлений, создаваемые течениями.

Газовый анализ среды производился при отборе газов капиллярной трубкой 8 с наружным и внутренним диаметрами 1.0 и 0.6 mm, соединенной с газоанализатором 9 марки „Тест“. При измерениях в трубку поступала смесь газов, образовавшаяся непосредственно у среза трубки, независимо от соотношения диаметров сопла и трубки. Газоанализатор позволял определять объемные концентрации  $\text{CO}_2$  с временным интервалом 5 s и погрешностью 5%. Отбор проб смеси  $\text{CO}_2$  с воздухом производился в сечениях, перпендикулярных оси струи

на разных расстояниях от сопла, в том числе на поверхностях диска.

### Взаимодействие струи $\text{CO}_2$ с неподвижной проницаемой преградой (диск)

Свободная осесимметричная струя  $\text{CO}_2$ , распространяющаяся в неподвижной воздушной среде, перед взаимодействием с преградой пространственно неоднородна по скоростям и концентрациям газа струи. В каждом сечении струи скорости и концентрации  $\text{CO}_2$  монотонно убывают в радиальном направлении от максимума на оси струи до нуля на периферии. Кроме того, эти характеристики убывают обратно пропорционально длине струи при ее распространении до преграды [1]. Поэтому параметры струи при контакте с преградой определяются скоростью впрыска  $U_0$ , расстоянием от сопла до преграды  $l_c$  и локальными характеристиками струи.

На рис. 2 представлены теньевые изображения натекания струи  $\text{CO}_2$  на преграду из никелевого ВПЯМ на расстоянии  $l_c = 50$  mm при разных скоростях впрыска  $U_0 = 124, 175$  и  $248$  m/s. При относительно малых скоростях (рис. 2, *a*) видно четкое изображение струи до преграды, перед которой образуется течение от центра к периферии. На некотором расстоянии от оси струи течение отрывается от поверхности преграды и распространяется за пределы преграды. На рис. 2, *a* также видно, что часть струи проходит через преграду и образует за ней поток, параллельный оси струи. При увеличении скорости струи (рис. 2, *b*) перед преградой наблюдается неоднородная картина, на фоне которой просматриваются образования в виде колец вокруг струи, изображение которой частично экранируется течениями в пространстве между соплом и преградой. Анализ видеофильма процесса 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

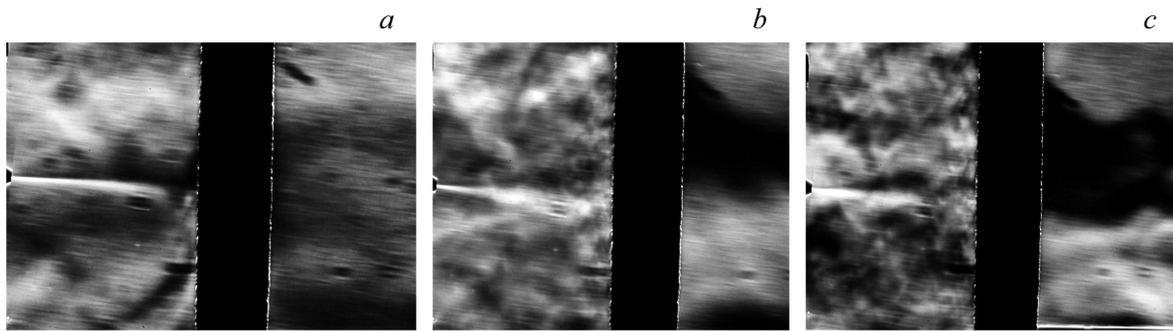


Рис. 2. Теневые изображения взаимодействия струи  $\text{CO}_2$  с преградой  $U_0, \text{m/s}$ :  $a$  — 124,  $b$  — 175,  $c$  — 248.



Рис. 3. Визуализация течений с помощью дыма при  $U_0 = 240 \text{ m/s}$ .  $a$  —  $l_c = 50$ ,  $b$  —  $l_c = 60$ ,  $c$  —  $l_c = 75 \text{ mm}$ .

еще больших скоростях впрыска возвратные течения интенсифицируются и могут состоять из нескольких кольцевых вихрей, „вложенных“ друг в друга. Поток за преградой также интенсифицируется и становится менее однородным (рис. 2,  $c$ ). Измерения изображений показали, что диаметр потока за преградой на 10–20% меньше диаметра растекающегося по лицевой поверхности преграды потока.

Таким образом, с увеличением скорости струи картина течений перед преградой существенно меняется от растекания по поверхности и отрыва от нее до образования вокруг струи течения, которое циркулирует от преграды в сторону сопла, затем после разворота — в обратном направлении попутно движению струи.

Визуализация течений с помощью дыма производилась при тех же условиях, что и теневая съемка. На рис. 3 показаны изображения, полученные при впрыске  $\text{CO}_2$  из сопла диаметром 0.5 mm со скоростью 240 m/s на разных расстояниях  $l_c = 50, 60$  и 75 mm соответственно (сопло расположено слева внизу). Струйки дыма между соплом и преградой визуализируют ламинарные линии тока эжектируемого струей  $\text{CO}_2$  окружающего воздуха и направлены к оси струи. При относительно малых расстояниях  $l_c = 50 \text{ mm}$  (рис. 3,  $a$ ) струйки не доходят до оси и резко обрываются при взаимодействии с пространственным течением, которым, вероятно, является кольцевой вихрь. Совокупность точек обрыва струек обнаруживает внешние контуры вихря овальной формы. За 5–10 mm 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 дыма, образовавшиеся позади преграды. При  $l_c = 60 \text{ mm}$

(рис. 3,  $b$ ) струйки обрываются при взаимодействии с вихрем большого диаметра и также разворачиваются перед преградой в общий поток. Дальнейшее увеличение  $l_c$  (рис. 3,  $c$ ) качественно меняет картину: струйки дыма почти достигают оси струи и кольцевой вихрь не образуется. Таким образом, увеличение расстояния между соплом и преградой меняет картину течений аналогично рассмотренному выше уменьшению скорости струи  $\text{CO}_2$ , поскольку скорость контакта струи с преградой обратно пропорциональна  $l_c$ .

Распространение струи  $\text{CO}_2$ , образование течений впереди, внутри и позади проницаемой преграды сопровождаются интенсивным перемешиванием газа с окружающим воздухом. Количественную информацию о составе образующейся смеси  $\text{CO}_2$  с воздухом позволил получить газовый анализ. На рис. 4 показана трехмерная картина распределения концентрации  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2}$ ) по длине струи в сечениях радиуса 60 mm, полученная при впрыске с  $U_0 = 250 \text{ m/s}$  на преграду из ВПЯМ, установленную на расстоянии 60 mm от сопла. У среза сопла (кривая 1) наблюдается резкий пик  $\text{CO}_2$  на оси струи (в ее ядре), переходящий в плато с концентрациями в 2–2.5%. В сечении через 20 mm от сопла (кривая 2) максимум концентрации  $\text{CO}_2$  на оси значительно уменьшается, а значения  $C_{\text{CO}_2}$  на плато практически не изменяются. Вблизи преграды (кривая 3) концентрации  $\text{CO}_2$  в приосевой зоне уменьшается, а в периферийных участках увеличивается до 4–5%. Полученные результаты показывают, что углекислый газ имеется не только в ядре и в зоне смешения струи, но и в области, значительно превышающий радиус струи в данных сечениях. Поэтому можно предположить наличие  $\text{CO}_2$  в этой области в результате циркуляции

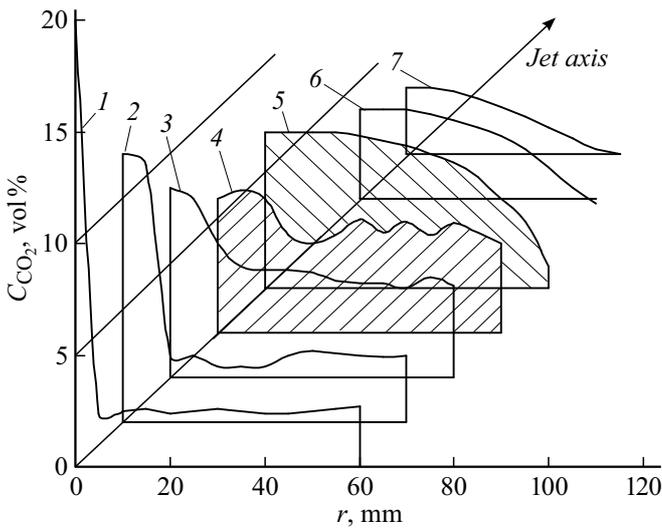


Рис. 4. Распределение концентраций CO<sub>2</sub> при натекании струи на преграду.

направлении. Течение 4, образующееся при развороте струи перед преградой, распространяется параллельно лицевой поверхности преграды и выходит за ее пределы. Часть струи 5 растекается внутри преграды с последующим выходом либо на ее лицевую поверхность и сливается с растекающимся потоком, либо на заднюю поверхность, соединяясь с течением за преградой. Часть растекающегося перед преградой потока отрывается от последнего и образует возвратное течение, циркулирующее между соплом и преградой и обратно в виде тороидального вихря 6. При этом в зону циркуляции 6 и в течение 4 эжектируется окружающий воздух 7 с образованием смеси воздуха с газом струи. Представленная схема течений является характерной в исследованном диапазоне изменения условий экспериментов. При относительно малых скоростях контакта струи с преградой струя растекается по преграде и частично проходит ее насквозь; зоны циркуляции 6 при этом не образуется. Поэтому структурой течений и распределением газа струи по течениям можно управлять путем изменения условий натекания струи на преграду.

### Взаимодействие струи CO<sub>2</sub> с вращающимся высокопроницаемым диском

Эксперименты проводились при аналогичных условиях и с теми же средствами диагностики, что и с неподвижной преградой — диском. Диск устанавливался на валу электродвигателя (на рис. 1, а не показан), обеспечивающий вращение со скоростью  $N = 0-750$  rpm. Для того чтобы втулка крепления диска не вносила возмущений в процесс, струя CO<sub>2</sub> направлялась на диск с условием, чтобы ее ось пересекала диск на половине его радиуса.

Теневые изображения струи, диска и возникающих в результате их взаимодействия течений, полученные при  $U_0 = 250$  m/s,  $l_c = 60$  mm и различных значениях  $N$ , показаны на рис. 6. При натекании струи на неподвижный диск (рис. 6, а) образуются течения по поверхности и позади диска, а также циркуляционное течение между соплом (расположено слева) и диском, частично экранирующее струю. При вращении диска (рис. 6, б) картина течений меняется: изображение струи просматривается до диска за счет исчезновения циркуляционного течения, течение за диском ограничивается по длине, течение перед диском утончается и появляется течение из цилиндрической поверхности диска. С увеличением  $N$  до 500 rpm (рис. 6, в) сохраняется растекание по диску, течение позади диска укорачивается, а течение из цилиндрической поверхности интенсифицируется.

Дополнительной информацией к описываемому процессу является визуализация течений дымом. На рис. 7, а изображено расположение струек дыма при вращении диска без впрыска струи CO<sub>2</sub>. Траектории струек показывают линии тока окружающего воздуха к лицевой

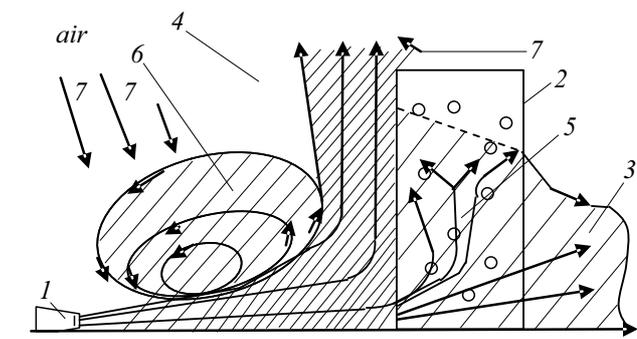
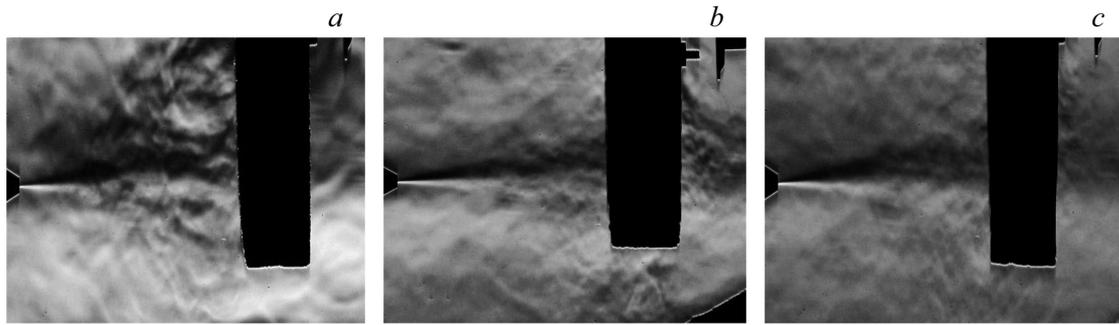


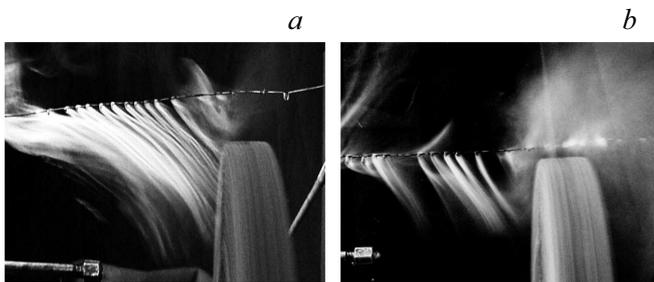
Рис. 5. Схема течений при натекании струи CO<sub>2</sub> на преграду: 1 — сопло, 2 — преграда, 3 — течение за преградой, 4 — растекание перед преградой, 5 — течение внутри преграды, 6 — циркуляционное течение, 7 — эжекция воздуха.

течения газа между соплом и преградой. На преграде (кривая 4 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 5, заштрихована) все неоднородности сглаживаются, и  $C_{CO_2}$  с постоянного максимального значения (5%) в приосевой зоне струи плавно снижается к периферии. В сечениях, удаленных от преграды (кривые 6, 7)  $C_{CO_2}$  также плавно снижается от оси к краю сечения, и размеры струи за преградой сокращаются.

Полученные результаты комплексной диагностики, а также литературные данные позволяют представить картину течений, изображенную на рис. 5. При впрыске газовой струи из сопла 1 на проницаемую преграду 2 образуются следующие течения. Течение 3 проходит преграду насквозь с последующим движением в осевом



**Рис. 6.** Теневые изображения взаимодействия струи с вращающимся диском из ВПЯМ.  $U_0 = 250$  м/с,  $l_c = 60$  мм, *a* —  $N = 0$  rpm; *b* —  $N = 300$  rpm; *c* —  $N = 500$  rpm.

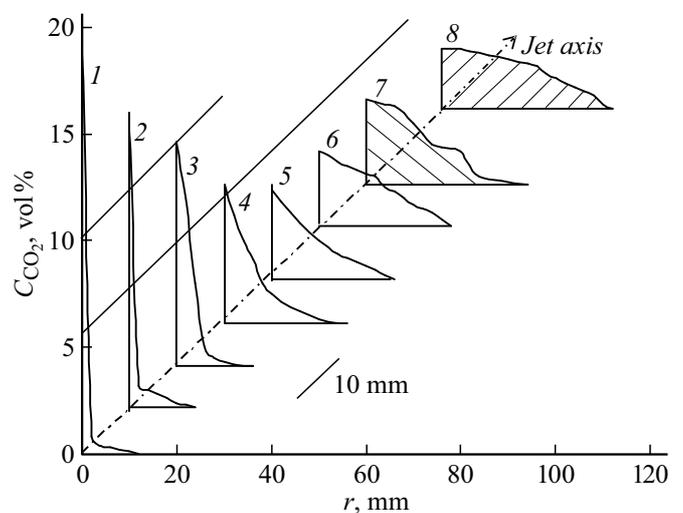


**Рис. 7.** Визуализация течений дымом при вращении диска.  $N = 500$  rpm, *a* — без струи  $\text{CO}_2$ ; *b* — при впрыске  $\text{CO}_2$  с  $U_0 = 250$  м/с.

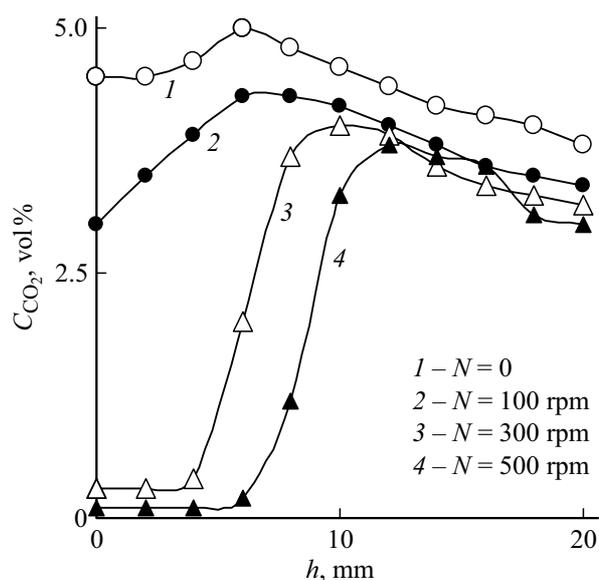
поверхности диска, через которую воздух всасывается внутрь диска. При впрыске струи  $\text{CO}_2$  (рис. 7, *b*) при тех же значениях  $N$  струйки обрываются; совокупность точек обрыва показывают контуры струи, которая растекается по диску и сливается с течением из цилиндрической поверхности. Причем циркуляционное течение, окружающее струю, взаимодействующую с неподвижной преградой (рис. 5), не образуется, поскольку оно уносится потоком всасываемого диском воздуха.

Количественную информацию о составе образующейся смеси  $\text{CO}_2$  с воздухом позволил получить газовый анализ, для которого отбор проб газа производился в сечениях, перпендикулярных оси струи с шагом 10 мм. На рис. 8 показана трехмерная картина распределения концентраций ( $C_{\text{CO}_2}$ ) в сечениях струи и на преграде, полученная при  $U_0 = 250$  м/с,  $l_c = 60$  мм и  $N = 500$  rpm. У среза сопла (кривая 1) и в последующих сечениях (кривые 2, 3) наблюдаются резкие пики концентраций в ядре струи. Ниже по течению струи (кривые 4–6) пиковые значения  $C_{\text{CO}_2}$  значительно снижаются, и радиус струи увеличивается за счет расширения периферийных участков. На лицевой поверхности диска (кривая 7, заштрихована) концентрации в приосевой части струи относительно выравниваются, снижаясь с 5 до 3,5%, после чего резко падают и плавно уменьшаются до нуля. На тыльной стороне диска (кривая 8, заштрихована) концентрации  $\text{CO}_2$  еще более выравниваются, плавно снижаясь с 4 до 2,5% от центра к периферии. Сравнение

представленных данных с результатами, полученными для неподвижного диска (рис. 4), показывает, что перед вращающимся диском поперечные размеры струи существенно сокращаются за счет исчезновения циркуляционного течения, а основная масса  $\text{CO}_2$  сосредоточена в приосевых участках струи и внутри диска. Внутри вращающегося диска происходит смешение воздуха и углекислого газа и перемещение смеси в радиальном направлении к периферии диска. Для определения состава смеси, выходящей из диска, срез трубки пробоотборника устанавливался в 1–2 мм от цилиндрической его поверхности и перемещался вдоль ее толщины ( $h = 20$  мм) в осевом направлении. В результате такого сканирования определялся интегральный по сечениям диска состав выходящей смеси, представленный на рис. 9 при различных значениях  $N$ . Внутри неподвижного диска (кривая 1) газ распределяется относительно равномерно с падением концентрации на тыльной стороне. При вращении и с ростом  $N$  концентрации  $\text{CO}_2$  у лицевой поверхности существенно уменьшаются (кривые 2–4), а максимумы  $\text{CO}_2$  достигаются в середине диска, после чего наблюдается падение к тыльной стороне



**Рис. 8.** Распределение концентраций  $\text{CO}_2$  при натекании струи на вращающийся диск.



**Рис. 9.** Распределение концентраций  $CO_2$  в смеси, выходящей из диска, по его толщине ( $h$ ) в зависимости от скорости вращения.

диска. Неоднородность состава смеси, выходящей из диска по его толщине, является результатом влияния различных факторов. Движение струи внутри вращающегося диска определяется действием нескольких сил: инерции — в осевом направлении; гидравлического сопротивления, вызывающего торможение; радиально к периферии диска — под действием центробежных сил; за счет трения о внутренние перегородки ячеек — в тангенциальном направлении. Приосевые участки струи с максимальными скоростями и концентрациями  $CO_2$  проходят большую толщину диска, чем периферийные участки с меньшими скоростями и концентрациями. После торможения все участки струи под действием центробежных сил и трения движутся в радиальном направлении к цилиндрической поверхности диска, где регистрируется концентрационное расслоение по толщине диска, показанное на рис. 9. Отмеченные особенности могут быть использованы в создании устройств для получения и отбора с цилиндрической поверхности диска (при наличии улитки, разделенной на секции) смесей газов заданного состава.

### Заключение

Исследования показали, что при натекании осесимметричной струи на неподвижную высокопроницаемую преграду образуется несколько течений. Часть струи проходит через преграду и за ее пределы в осевом направлении. Часть струи разворачивается перед преградой и разветвляется на течение по ее поверхности и на течение, циркулирующее между соплом и преградой. Часть струи растекается внутри преграды с последующим выходом либо на ее лицевую поверхность,

либо на тыльную поверхность, соединяясь с потоком за преградой. При этом струя и течения эжектируют окружающий воздух, который активно перемешивается с газом струи, образуя смесь, состав которой зависит от условий эксперимента. Полученные схема течений и распределение концентраций  $CO_2$  использовались при создании устройства для сжигания струи пропан-бутана (по плотности близок к  $CO_2$ ) на диске из никелевого ВПЯМ. Испытания показали высокую устойчивость и эффективность процесса [8].

При вращении диска картина течений существенно меняется вследствие образования потоков окружающего воздуха к лицевой и тыльной поверхностям диска, а также влияния центробежных сил. Потоки воздуха увлекают за собой внутрь диска газ струи из циркуляционного течения и из течений впереди и позади диска. Это приводит к тому, что основная часть газа струи оказывается внутри диска и под действием центробежных сил движется, перемешиваясь с воздухом, в радиальном направлении к цилиндрической поверхности диска, откуда выбрасывается наружу. Описанные особенности показывают возможность использования вращающегося пористого диска в качестве реактора, в котором при одновременной подаче сред с различными свойствами могут быть реализованы разнообразные физико-химические процессы: смешение, теплообмен, химические реакции, горение, абсорбция. Так, например, совместная подача на вращающийся пористый диск загрязненного примесями воздуха и жидкого сорбента позволила провести эффективную сорбционную очистку воздуха от  $NH_3$ ,  $SO_2$  и  $CO_2$  [9]. Особенности процесса смешения рассматривались в настоящей работе.

### 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] *Баев В.К., Бажайкин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 5. С. 68–75.
- [7] *Баев В.К., Фомин В.М., Чусов Д.В.* и др. Пат. RU № 2256861. 2005.
- [8] *Баев В.К., Бажайкин А.Н.* // ФГВ. 2016. Т. 52. № 5. С. 23–32.
- [9] *Баев В.К., Бажайкин А.Н.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 8. С. 76–82.