

УДК 621.9

DOI: 10.63430/TIA202502005

Гидродинамика и теплообмен при натекании импактной ламинарной струи на каталитическую поверхность*

**В.В. Лукашов, В.В. Леманов, А.В. Тупикин, В.А. Федоренко,
К.А. Шаров**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: luka@itp.nsc.ru

В работе представлены результаты исследования влияния каталитического окисления водорода на теплоперенос в импактной струе при наличии химической активности на поверхности образца. Показано, что с увеличением процентного содержания водорода в смеси с воздухом наблюдается не только рост интенсивности теплообмена, но и расширение зоны реакций. Также отмечается, что в случае химически активной струи возникают пульсации температуры на поверхности (примерно 6 %), связанные с протеканием каталитических реакций окисления водорода. При этом вид зависимости распределения функции обобщенной температуры от радиуса на поверхности практически один и тот же для всех вариантов с гетерогенными химическими реакциями. Исключение составляет случай с молярным содержанием водорода в струе 2 %, когда имеются области с величиной тепловыделения от реакций ниже теплоотдачи при конвективном теплообмене с реагирующим потоком.

Ключевые слова: импактная струя, каталитическая поверхность, теплоотдача, плотность теплового потока, распределение температуры по поверхности.

Введение

Одной из приоритетных задач для различных направлений мировой науки является поиск решений, обеспечивающих экологическую безопасность и высокую эффективность энергетических установок. В настоящее время значительное внимание уделяется вопросу декарбонизации в промышленности, энергетике и транспорте [1–3]. Предлагаются различные методы для снижения углеродного следа: переход к «зеленой энергетике», пиролиз или термическое разложение метана на H_2 и C с последующей утилизацией или переработкой углерода на удобрения; создание альтернативных топливных смесей. Заметим, что выбросы CO_2 не могут быть уменьшены только за счет замены видов сырья и топлива. Требуется изменение в технологических процессах (модифицирование конструкций печей и котлов химических реакторов, разработка катализаторов и т.д.).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 25-49-00233. Оборудование предоставлено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800217-8).

Применение водорода для получения энергии в газотурбинных двигателях и топливных элементах обладает огромным потенциалом при решении задач снижения выбросов CO_2 мирового энергетического сектора. В топливных элементах активно используется горение бедных водородно-воздушных смесей в каналах при стабилизации с каталитической поддержкой на стенке [4]. Платиносодержащие каталитические материалы, нанесенные на твердую поверхность, способствуют повышению устойчивости горения как на поверхности, так и внутри объема газовой фазы. Скорость элементарных гетерогенных реакций зависит от многих факторов: от скорости реакций адсорбции, температуры поверхности, массовых долей топлива, кислорода и продуктов, находящихся в газовой фазе на пластине. Вследствие этого задачи поверхностной кинетики не могут решаться в отрыве от газодинамики внешнего течения [5]. Очевидно, что гетерогенное горение также оказывает влияние на газовый поток. В случае, когда гетерогенная реакция сопровождается изменением числа молекул в смеси, возникает стефановский поток, который ориентирован по нормали к каталитической поверхности. Важным аспектом при организации горения являются гидродинамические и теплофизические процессы в пристеночной зоне и основном течении топливно-воздушной смеси. Применение крупномасштабных когерентных структур для управления процессами тепломассопереноса широко используется в настоящее время [6, 7]. Результаты, представленные в работе [8], показали, что если гетерогенная каталитическая реакция окисления протекает в диффузионном режиме, неоднородность газового состава у поверхности может привести к неравномерному изменению свойств катализатора, возникающему из-за образования оксидов, и, соответственно, к изменению шероховатости поверхности. Заметим, что для проектирования топливных систем на окислительных катализаторах важно иметь информацию о структуре и химическом составе катализатора в реальных условиях с учетом изменения параметров (давления, температуры и состава). Таким образом, исследования на модельных объектах являются неотъемлемой частью решения технических и технологических задач. Следует отметить, что ранее, как правило, изучались турбулентные режимы натекания импактных струй на преграды. Ламинарные режимы натекания импактных струй слабо изучены, даже в случае сред без химической активности.

Целью настоящей работы является изучение гидродинамических особенностей и теплообмена при натекании импактной ламинарной струи на каталитическую поверхность. Для этого авторами исследуется тепловая динамика при натекании водородосодержащей струи на нагретую каталитическую поверхность. Рассматриваются режимы течения с числами Рейнольдса ($\text{Re} < 2000$), когда истечение в пространстве происходит в ламинарном режиме, а на выходе из трубки реализуется установившееся течение Пуазейля.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Расход топливной смеси задавался с помощью генератора топливной смеси 1. В качестве топлива использовалась водородно-воздушная смесь. Струя топлива истекала из трубки 2 длиной $l = 1$ м с внутренним диаметром $d = 3$ мм ($l/d = 333$) в затопленное пространство (свободную атмосферу) и натекала под углом 90° на нагретую пластину 3 диаметром $D = 2R = 100$ мм и толщиной $\Delta = 3$ мм с температурой поверхности $T_{w0} = 140 - 350$ °С. Для нагрева пластины применялся электрический нагреватель с автоматической поддержкой заданной температуры 4. Катализатор, используемый для формирования покрытия на металлическом диске, был изготовлен из гамма-оксида алюминия, модифицированного редкоземельными

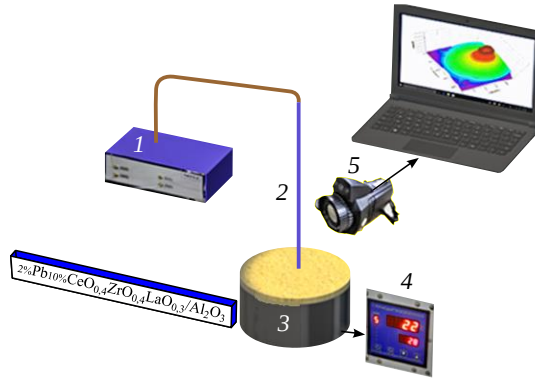


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — генератор газовых смесей УФИГС-2, 2 — трубка подачи газообразного топлива,
3 — нагреваемая пластина с каталитической поверхностью,
4 — управление электрическим нагревателем, 5 — тепловизор.

металлами и содержащего активный каталитический компонент — палладий. Расстояние от трубки до преграды варьировалось в диапазоне $h = 9 - 60$ мм ($h/d = 3 - 20$). Число Рейнольдса ($Re = u_0 \cdot d/\nu$) определялось по диаметру трубки, кинематическая вязкость топливной смеси ν при комнатной температуре бралась из справочных данных, u_0 — средняя по расходу скорость. Распределение температуры на поверхности регистрировалось тепловизионной камерой Testo 890-2 5.

Описание результатов

Опыты проводились на ламинарных режимах истечения из трубки воздуха и бедной водородно-воздушной смеси (молярная доля водорода $X_{H_2} = 2 - 10$ % или коэффициент избытка топлива $\varphi = 0,07 - 0,32$). Перед подачей топливной смеси катализатор нагревали до температуры T_{w0} . Затем проводилась съемка термограммы поверхности, используемая в дальнейшем при обработке данных. На рис. 2 представлены распределения

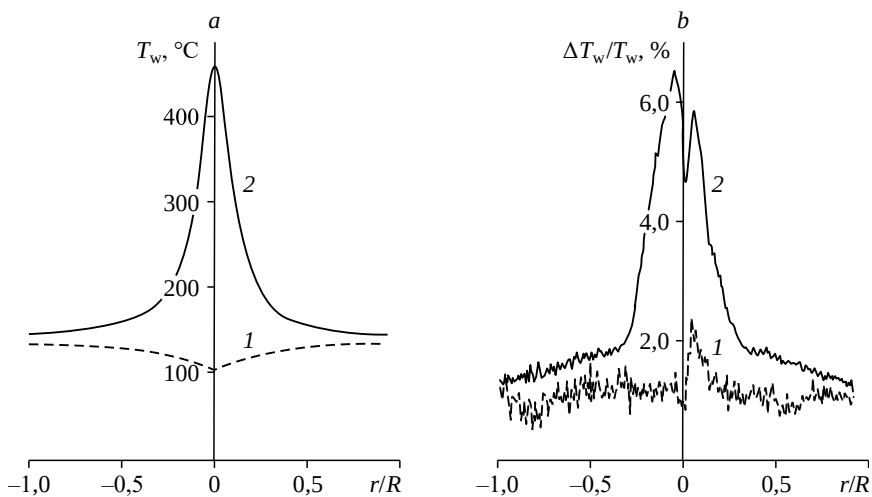


Рис. 2. Осредненная по выборке температура поверхности образца (a) и среднее квадратичное отклонение (b) при натекании инертной (кривая 1) и химически активной (кривая 2) струй.

осредненной по выборке температуры на поверхности образца $T_w(r/R)$ и среднеквадратичного отклонения $\Delta T_w/T_w(r/R)$ для случаев натекания на преграду инертной (воздух) и химически активной (бедная водородно-воздушная смесь $\varphi = 0,26$) струй. Расстояние до преграды $h/d = 15$, $Re \approx 1800 - 1900$, начальная температура поверхности $T_{w0} = 140$ °С. Тепло, выделяемое в результате экзотермической реакции, увеличивало тепловые потоки образца в окружающую среду и, соответственно, температуру каталитической поверхности (рис. 2а). Как можно заметить, если среднеквадратичное отклонение температуры для инертной среды (воздух) носит случайный и равномерный по радиусу характер, то в случае химически активной струи наблюдается существенный рост пульсаций температуры за счет протекания каталитических реакций (см. рис. 2б).

В работе с целью анализа влияния каталитического окисления водорода на теплоперенос оценивалось изменение тепловых потоков относительно условий без химических реакций. Для этого применялся закон Ньютона – Рихмана: $q = \alpha [T_w - T_0]$, T_w — распределение температуры на поверхности, T_0 — температура окружающей среды, α — коэффициент теплоотдачи с поверхности, который является функцией числа Нуссельта ($\alpha \sim Nu$). Для рассмотренных топливных смесей термодинамические свойства (теплопроводность, вязкость смеси) практически не изменяются. В случае ламинарного натекания на преграду влияние на коэффициент теплоотдачи изменения состава пристенного потока и гетерогенной реакции по оценкам авторов является незначительным: $\alpha_{\text{mix}}/\alpha_{\text{air}} \approx 1,02$, (α_{mix} — для смеси, α_{air} — для воздуха). На рис. 3 отражено влияние каталитического окисления водорода на теплоотдачу при изменении процентного соотношения по водороду $\tilde{q} = (q_{\text{mix}}/q_{\text{air}} - 1)$, где q_{mix} , q_{air} — плотности теплового потока соответственно при натекании смеси и при натекании воздушного потока. Здесь наблюдается не только рост интенсивности тепловых потоков, но и расширение области, на которой заметно влияние химических реакций. Интегральная теплоотдача с поверхности может

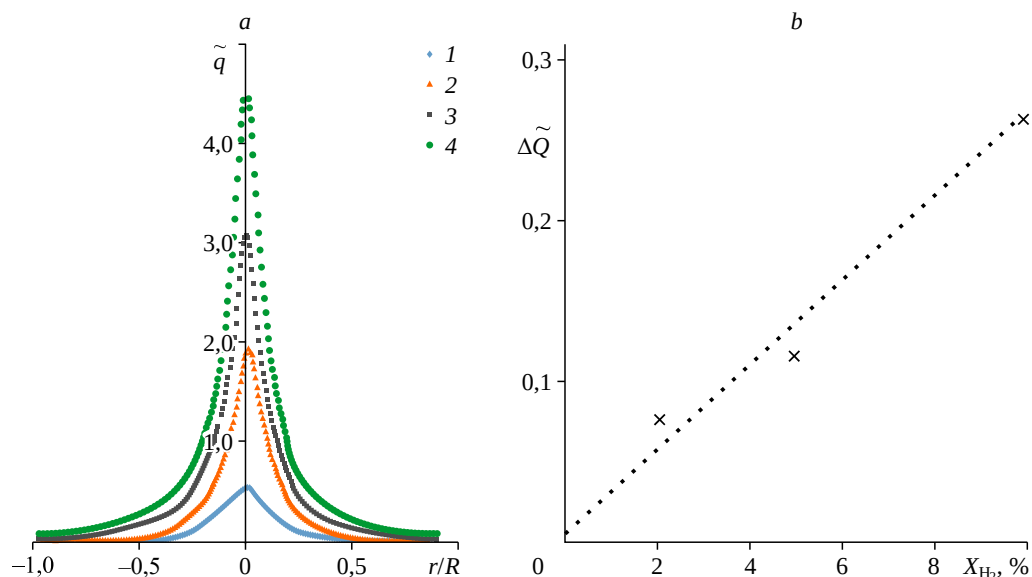


Рис. 3. Влияние каталитического окисления водорода на теплоотдачу в зависимости от количества водорода в смеси по плотности теплового потока (а) и по интегральной теплоотдаче (б).

Процентное соотношение по водороду: 1 — 2 %, 2 — 5 %, 3 — 7 %, 4 — 10 %.

быть отражена как $\Delta Q = \int_0^R 2\pi [T_w(r) - T_0] r dr$, при этом относительный прирост составит

$$\Delta \tilde{Q} = \int_0^R 2\pi [T_w^{\text{mix}}(r) - T_0] r dr \bigg/ \int_0^R 2\pi [T_w^{\text{air}}(r) - T_0] r dr - 1. \text{ Здесь } T_w^{\text{mix}} \text{ и } T_w^{\text{air}} \text{ — распределе-}$$

ния температуры на поверхности при натекании смеси или воздушного потока соответственно. Увеличение мощности теплоотдачи практически линейно связано с количеством добавляемого водорода.

Если для функции разности плотности теплового потока задать порог отличия от нуля, например $\tilde{q}(r_{\text{ch}}/R) = (q_{\text{mix}}/q_{\text{air}} - 1) \leq 0,01$, то можно оценить зону каталитической активности поверхности r_{ch} при изменении условий эксперимента. При приближении трубки к поверхности на расстояние $h/d = 5$ для наиболее бедных составов ($X_{\text{H}_2} = 2$ и 5 %) расширение области каталитической активности достаточно значительное, тогда как смесь с $X_{\text{H}_2} = 10$ % демонстрирует неполное окисление при протекании вдоль по-

верхности. Если построить функцию обобщенной температуры $\theta = \frac{T_w - T_{\text{out}}}{T_{\text{axe}} - T_{\text{out}}}$ (где T_{out} и T_{axe} — соответственно температуры на краю пластины и на оси (в точке торможения)), то и для всех случаев с химическими реакциями получается практически единая кривая (см. рис. 4). Исключение составляет содержание водорода с $X_{\text{H}_2} = 2$ %, когда имеются области, где тепловыделение от реакций ниже теплоотдачи при конвективном теплообмене с нереагирующим потоком.

Заключение

Проведены исследования влияния каталитического окисления водорода на теплоперенос в импактной струе при наличии химической активности на поверхности образца. Выбранные для анализа параметры позволили углубленно изучить физический процесс. Показано, что с увеличением процентного содержания водорода в смеси с воздухом наблюдается не только рост интенсивности теплообмена, но и расширение зоны реакций. Также установлено, что в случае химически активной струи возникают пульсации температуры на поверхности (примерно 6 %), связанные с протеканием каталитических реакций окисления водорода. При этом вид зависимостей распределения функции обобщенной температуры от радиуса на поверхности практически одинаков для всех вариантов с химическими реакциями. Исключение составляет случай с содержанием водорода с $X_{\text{H}_2} = 2$ %, когда имеются области с тепловыделением от реакций ниже, чем теплоотдача при конвективном теплообмене с нереагирующим потоком.

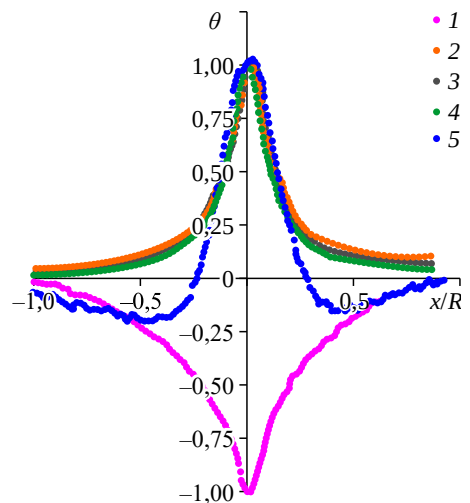


Рис. 4. Функции обобщенной температуры.

Область каталитической активности
в условиях воздуха (1) и в случаях
различных процентных соотношений по водороду:
10 % (2), 7 % — (3), 5 % (4), 2 % (5).

Список литературы

1. **de Pee A., Pinner D., Roelofsen O., Somers K., Speelman E., Witteveen M.** Decarbonization of industrial sectors: the next frontier. McKinsey & Company, 2018. 68 p.
2. **Nose M., Kawakami T., Nakamura S., Kuroki H., Kataoka M., Yuri M.** Development of hydrogen/ammonia firing gas turbine for decarbonized society // Mitsubishi Heavy Indust. Techn. Rev. 2021. Vol. 58, No. 3. P. 1–11.
3. **Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J.** Ammonia for power // Prog. Energy Combust. Sci. 2018. Vol. 69. P. 63–102.
4. **Kim J., Yu J., Lee S., Tahmasebi A., Jeon C.H., Lucas J.** Advances in catalytic hydrogen combustion research: catalysts, mechanism, kinetics, and reactor designs // Intern. J. Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. P. 40073–40104.
5. **Mellado J.D., Kindelan M., Sánchez A.L.** A simplified formulation for heterogeneous catalytic combustion in stagnation-point flows // Combust. Flame. 2003. Vol. 132. P. 596–599.
6. **Renard P.H., Thevenin D., Rolon J.C., Candel S.** Dynamics of flame/vortex interactions // Prog. Energy Combust. Sci. 2000. Vol. 26. P. 225–282.
7. **Ginevsky A.S., Vlasov Y.V., Karavosov R.K.** Acoustic control of turbulent jets, Berlin: Springer, 2004. 248 p.
8. **Pfaff S., Ramisch L., Gericke S.M., Larsson A., Lundgren E., Zetterberg J.** Visualizing the gas diffusion induced ignition of a catalytic reaction // ACS Catalysis. 2022. Vol. 12, No. 11. P. 6589–6595.

*Статья поступила в редакцию 2 декабря 2024 г.,
принята к публикации 5 декабря 2024 г.*