

С. В. Какаулин^{1}, В. Г. Меледин¹, И. К. Кабардин¹*

Исследование кинематики потока в структурированном многослойном каталитическом картридже

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: kakaulin_sergeri@mail.ru

Аннотация. Снижение выбросов вредных веществ в атмосферу является крайне актуальной проблемой, и разработка эффективных каталитических установок может стать важным шагом в ее решении. Распределитель газового потока и использование лопастей в форме крыльев перед картриджем могут помочь выровнять профиль скорости газового потока и обеспечить более равномерную подачу газов на каталитический картридж. Изучение кинематики потока с помощью лазерного доплеровского анемометра также может помочь оптимизировать работу каталитической установки и достичь максимальной эффективности ее работы. В целом, все эти меры могут привести к созданию более компактных, энергоэффективных и экологически чистых каталитических установок, которые будут способствовать сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу.

Ключевые слова: каталитические установки, визуализация потока, турбулентность

S. V. Kakaulin^{1}, V. G. Meledin¹, I. K. Kabardin¹*

Investigation of Flow Kinematics in the Structured Multibed Catalytic Cartridge

¹ S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kakaulin_sergeri@mail.ru

Abstract. Reducing emissions of harmful substances into the atmosphere is an extremely urgent problem, and the development of efficient catalytic plants can be an important step in its solution. A gas flow distributor and the use of wing-shaped vanes in front of the cartridge can help to even out the gas flow velocity profile and provide a more uniform gas supply to the catalytic cartridge. Studying the flow kinematics with a laser Doppler anemometer can also help optimize the operation of a catalytic plant and achieve maximum efficiency. In general, all these measures can lead to the creation of more compact, energy efficient and environmentally friendly catalytic plants, which will help reduce emissions of harmful substances into the atmosphere.

Keywords: catalytic plants, flow visualization, turbulence

Введение

Разработка высокоэффективных и компактных каталитических установок для нейтрализации газовых выбросов от вредных летучих органических соединений является очень актуальной задачей. Создание катализатора с чрезвычайно низким содержанием платины (0,01–0,02%) и его использование в каталитическом картридже из стеклопластикового материала являются важным шагом в этом направлении. Однако, важно обеспечить равномерную подачу газового по-

тока, чтобы обеспечить максимальную эффективность работы катализатора. Для этого были созданы распределитель газового потока и аэродинамический измерительный стенд, который позволяет исследовать и оптимизировать равномерность потока.

Модель состоит из нескольких функциональных блоков, таких как секция смесителя, секция управления и поворотного устройства, секция катализатора и узел форсунки. Воздух подается в модель через вентилятор и компрессор, а потоки газа проходят через расходомеры. Температура в потоке измеряется термопреобразователями, а избыточное давление – датчиками давления. Гидравлическое сопротивление потока измеряется по перепаду давления на поворотном устройстве и на участке катализатора с помощью датчиков перепада давления. Использование такого стенда позволяет получить информацию о равномерности распределения газового потока, что позволяет оптимизировать конструкцию каталитической установки, улучшить ее эффективность и экономичность.

Схема стенда с датчиками показана на рис. 1. Геометрия модели экспериментального стенда показана на рис. 2. Рабочей средой является воздух, а скорость потока увеличена до $250 \text{ н.м}^3/\text{ч}$. Максимальное избыточное давление составляло $0,03 \text{ МПа}$, а рабочая температура принимала значения в диапазоне от $23 \text{ }^\circ\text{C}$ до $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Число Рейнольдса варьировалось в диапазоне от 10000 до 50000.

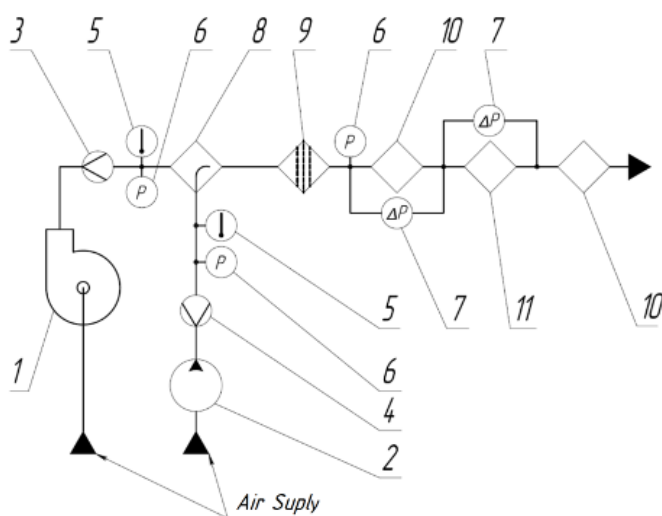


Рис. 1. Гидравлическая схема стенда

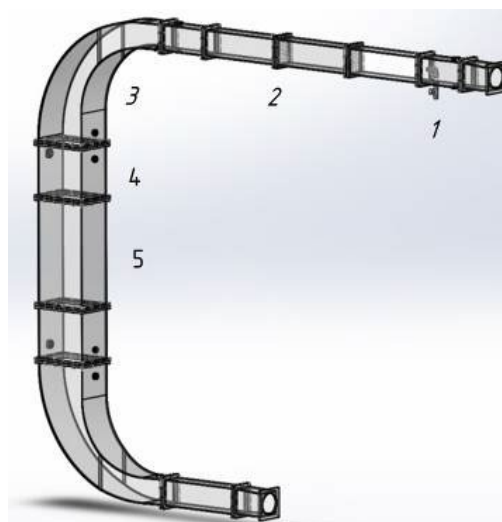


Рис. 2. 3D-геометрия макета: входная секция (1), смеситель (2), поворот (3), секция контроля (4) блок катализатора (5)

Для наших экспериментов мы использовали два каталитических картриджа, которые отличались геометрическими структурами. Один картридж сделан из металлических сетей с ячейками 1 мм , дистанция между тканями была 10 мм . Другой сделан из металлических гофрированных пластин. Длина картриджей была 250 мм .

Методы и материалы

Визуализация потока газа в модели распределителя позволяет получить качественную информацию о его характеристиках. Для этого используется метод визуализации потока воздуха с помощью мелких частиц и добавления индикаторов в поток газа с помощью дымогенератора. Световой луч, созданный твердотельным Nd:YAG-лазером, проходит через центральную плоскость потока и освещает целевую область, которая регистрируется с помощью CCD-камеры. Для получения точных характеристик яркости и контрастности экспозиция камеры и мощность лазера регулируются. Цифровая обработка изображений основана на обнаружении турбулентных структур в потоке. Измерение скорости производилось методом лазерной доплеровской анемометрии в диапазоне 0,001...400 м/с с относительной погрешностью, не превышающей 0,1%. Интерференционная картина лежала в зоне 0,1×0,1×0,5 мм, и позиционировалась в области 250×250×250 мм с погрешностью не более 0,1 мм.

Результаты

Визуализация газового потока была проведена в двух секциях – во вращающейся и управляющей секциях (рис. 3).

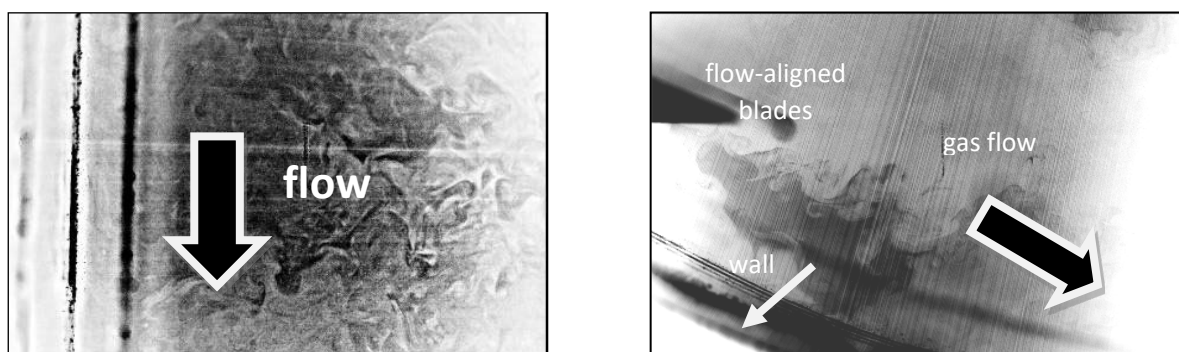


Рис. 3. Фотографии визуализации потока: секция управления (слева), поворотная секция (справа)

Результаты показали турбулентный режим течения с крупномасштабными вихревыми структурами, включая зоны рециркуляции с разделением пограничного слоя. Эти зоны обратного потока были вызваны нестационарными вихревыми дорожками Кармана, при числе Рейнольдса $Re = 50\ 000$ и уровне турбулентности $I = \Delta U / U$ в размере 23 %. Характерные размеры вихрей были рассчитаны с помощью метода визуализации потока и составили около 5–9 мм. Образование крупномасштабных вихревых структур оказывает влияние на процесс массообмена и эффективность каталитического картриджа.

Измерения скорости проводились в поперечном сечении каталитических картриджей на дистанции 45 мм от кромки при разных расходах потока (от 50 до 250 н.м³/ч). Измерены распределения скоростей как функции от массового расхода. Существуют интенсивные обратные течения, а на расстоянии около 35 мм начинается зона нулевой скорости.

Графики скорости внутри катализатора с сетками (рис. 4) при максимальном расходе 250 н.м³/ч выявили, что в каталитическом картридже с сетчатыми

направляющими не наблюдается зон обратного тока, как в картридже с каркасом из профилированных пластин (рис. 6). Тем не менее, также наблюдаются зоны резкого снижения скорости.

Также были сравнены профили скоростей до и после картриджа для различного положения лопастей в форме ветра (см. рис. 7, 8, 9). Сравнение показало, что для каждого отдельного профиля набегающего потока мы имеем разный профиль скорости после картриджа.

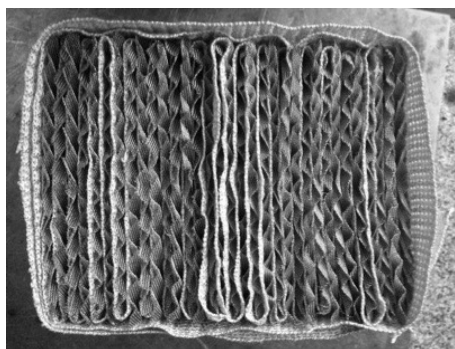


Рис. 4. Фотография катализатора с сетками

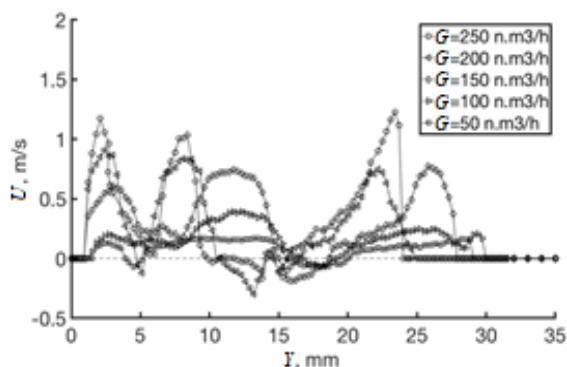


Рис. 5. Профили скорости для катализатора с пластинами

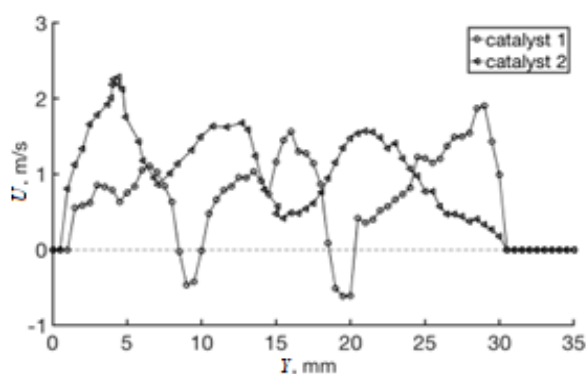


Рис. 6. Профили скоростей внутри картриджа с катализатором из металлических пластин (1) и металлических сеток (2)

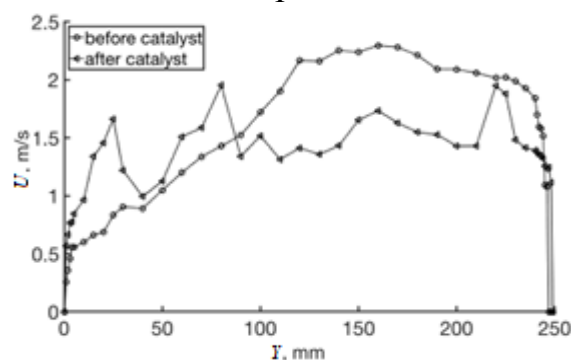


Рис. 7. Графики скоростей до и после катализатора при расходе 250 н.м³/ч. Сечение 1

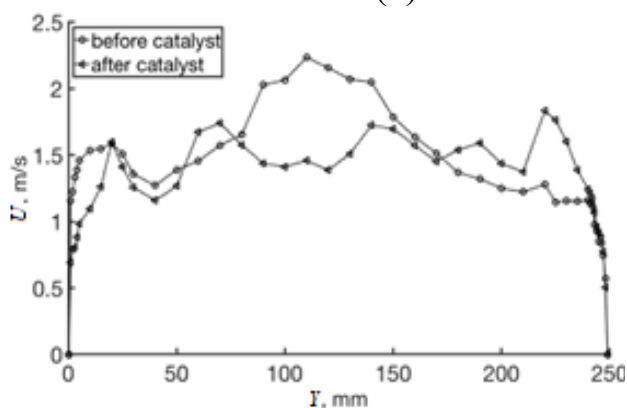


Рис. 8. Графики скоростей до и после катализатора при массовом расходе 250 н.м³/ч. Сечение 2

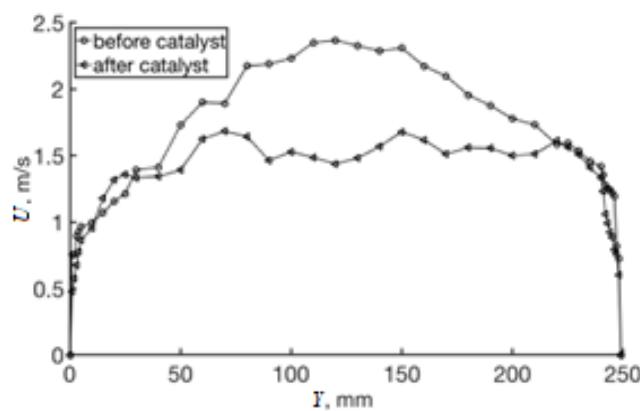


Рис. 9. Графики скоростей до и после катализатора при массовом расходе 250 н.м³/ч. Сечение 3

Заключение

Результаты измерений свидетельствуют о неравномерном распределении профиля скорости внутри картриджа, несмотря на выравнивание потока перед его поступлением на картридж. Наличие такой неравномерности усиливает массообмен внутри картриджа с катализатором, особенно в случае картриджей с каркасом из структурированных пластин, где возникают обратные токи. Были также проведены сравнительные измерения профилей скоростей до и после картриджа при различном положении лопасти. Сравнение показало, что для каждого отдельного профиля набегающего потока профиль скорости после картриджа различен.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D. Jecha, J. Martinec, V. Brummer, P. Stehlík, P. Leštinský. Modernization of Unit for Elimination of VOCs by Catalytic Oxidation // CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. – 2013. – Vol 35. – P. 745-750.
2. B.S. Bal'zhinimaev, I. V. Kovalyov., V.V. Kaichev, A.P. Suknev, V.I. Zaikovskii. Catalytic Abatement of VOC Over Novel Pt Fiberglass Catalysts // Topics in Catalysis. – 2017. – Vol. 60. – P. 73-82.
3. B.S. Bal'zhinimaev, V.N. Parmon. The Innovative Russian Approaches to Catalysts Design: New Generation of Fiberglass Catalysts // Topics in Catalysis. – 2017. – Vol. 55. – P. 1289-1296.

© С. В. Какаулин, В. Г. Меледин, И. К. Кабардин, 2023