

С. В. Какаулин^{1}, В. И. Полякова¹, М. Х. Правдина¹, И. К. Кабардин¹*

Применение визуализации методом лазерного ножа для исследования поворотно-расширяющегося потока

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

Аннотация. Для изучения структуры потока были применены различные методы теневой и интерференционной регистрации интегральных параметров потока излучения. Используемые в работе методы позволяют получить качественную картину течения в поворотно-расширяющемся потоке и представление о роли турбулентности в усилении тепло- и массопереноса в данном канале. Также получены данные о характерных размерах сформировавшихся крупномасштабных вихревых структур, что позволило сделать выводы об эффективности работы каталитического картриджа. Исследование проводилось на аэродинамическом стенде, который содержит комплекс контрольно-измерительных приборов, обеспечивающих измерение и регистрацию измеряемых параметров.

Ключевые слова: визуализация потока, метод лазерного ножа, аэродинамический стенд

S. V. Kakaulin^{1}, V. I. Polyakova¹, M. H. Pravdina¹, I. K. Kabardin¹*

Application of Visualization by the Laser Knife Method for the Study of a Rotating-Expanding Flow

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

Abstract. To study the structure of the flux, various methods of shadow and interference registration of integral parameters of the radiation flux were applied. The methods used in this work allow us to obtain a qualitative picture of the flow in a rotating-expanding flow and an idea of the role of turbulence in enhancing heat and mass transfer in this channel. Data on the characteristic sizes of the formed large-scale vortex structures were also obtained, which allowed us to draw conclusions about the efficiency of the catalytic cartridge. The study was carried out on an aerodynamic stand, which contains a complex of control and measuring devices that provide measurement and registration of the measured parameters.

Keywords: flow visualization, laser knife method, aerodynamic stand

Введение

В задачах интенсификации массопереноса возникает проблема выбора модели турбулентности для моделирования турбулентного массопереноса в поворотных дивергентных течениях, так как появилось большое количество моделей турбулентности. Для выбора подходящей модели необходимо провести сравнительный анализ различных моделей турбулентности, однако это может быть затруднительно, так как все методы настроены на определенный тип течения и содержат константы. Такие константы, как правило, получают на основе проведен-

ного эксперимента. Тип течения, рассматриваемый в данной работе, не является тривиальным. Поэтому использование существующих моделей расчета поворотно-расширяющегося течения зачастую не приведет к получению достоверных результатов. Таким образом, требуется экспериментальное определение значений констант.

Для проведения экспериментальных исследований с минимальной погрешностью и выбором представительных критериев для сравнения моделей необходимо провести серийные расчеты поворотно-расширяющихся течений с использованием разных моделей турбулентности. Результатом таких работ должны быть рекомендации по области применимости различных моделей турбулентности при моделировании турбулентного массопереноса в поворотно-расширяющихся течениях. Однако наибольшее значение имеют высокоточные экспериментальные исследования, которые позволяют верифицировать расчеты и составить представление о свойствах моделей турбулентности. Для диагностики сложных турбулентных потоков необходимы измерительные приборы с высоким пространственным и временным разрешением. Актуальным направлением в развитии оптических измерений является разработка методов диагностики, дающих возможность выполнять синхронные измерения при диагностике полей скорости в поворотно-расширяющихся течениях.

Методы и материалы

В потоке с помощью теневых и интерференционных методов можно фиксировать различные параметры, в том числе интегральные [1]. После обработки данных по регистрируемым изображениям можно получить точные данные о структуре течения и непосредственно о его пространственной конфигурации. Одним из современных методов мгновенной диагностики пространственных конфигураций потока является метод цифровой трассерной визуализации (PIV) [2]. Для получения картины течения методом PIV необходимо использовать трассирующие частицы, которые будут перемещаться по измеряемому объему и подсвечиваться источником света в определенном промежутке времени. В нашем случае в качестве источника света выступает «лазерный нож». В эксперименте рабочим сечением является плоскость, освещаемая «лазерным ножом». PIV регистрирует на камеру перемещение частиц за время между вспышками от источника света, в результате получаем смещение частиц из которого можно получить двухкомпонентное поле скорости. Следовательно, для получения трех компонент, необходимо использовать несколько регистрирующих модулей, при этом необходимо сориентировать оптические оси модулей под определенным углом.

Метод лазерной доплеровской анемометрии [3] использует измерение перемещений взвешенных в потоке частиц (трассеров) на основе оптического эффекта Доплера. Частицы генерируют оптический сигнал при пересечении интерференционного поля. Этот сигнал несет информацию о скорости трассеров. Анализ лазерно-индуцированной флуоресценции, комбинационного антистоксова рассеяния света составляют основу данного оптического метода.

Установка для исследования поворотно-расширяющегося потока, используемая для дожига различных летучих органических соединений, была изготовлена и дооснащена измерительным оборудованием (рис. 1. а, б).

Подача воздуха осуществлялась с помощью вентилятора 1, по потоку в начале рабочего участка был установлен расходомер 2, далее в секции 2 (рис 1. а), были оборудованы датчики температуры 3 и давления 4. Для измерения избыточного давления были задействованы датчики 4 и 6. Участок, на котором реализуется поворотно-расширяющееся течение, обозначен 7 и 9, в дополнение между этими участками замерялось гидравлическое сопротивление.

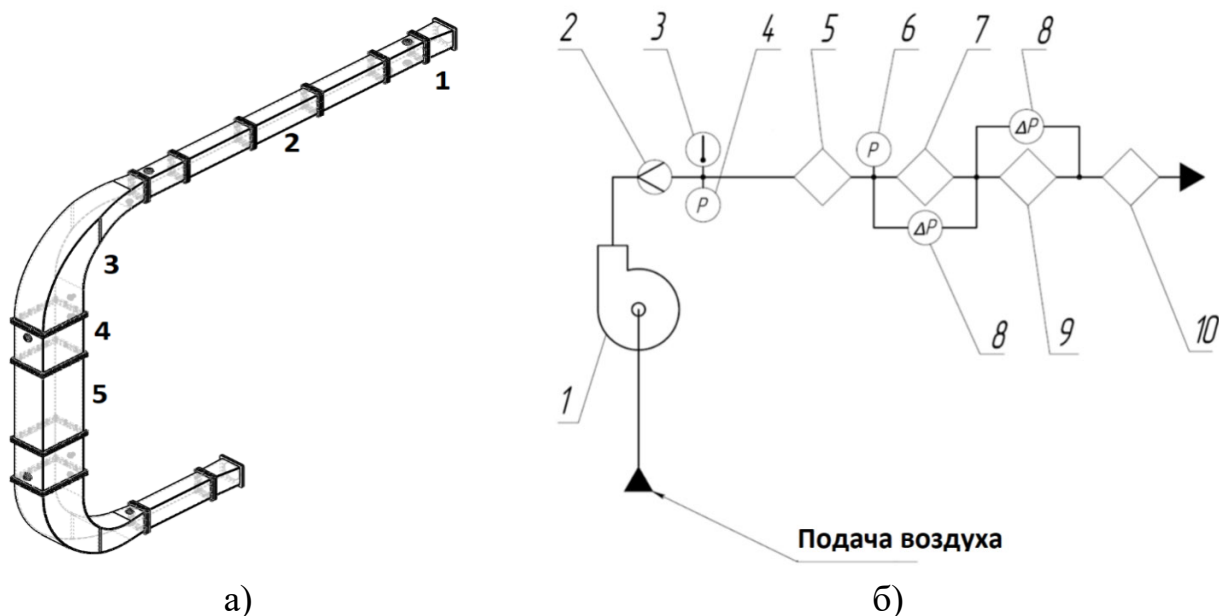


Рис. 1. Экспериментальная установка: а) каркасная модель каталитической установки; б) схема стенда

Рабочий участок имеет габаритные размеры 600x3000x2300 мм. Отношение площади выходного сечения к площади входного сечения равно 5 к 1. Поперечное сечение выхода после первого поворотно-расширяющегося колена имеет форму прямоугольника со сторонами, соотносящимися как 2:3. Форма поперечного сечения газотока также является прямоугольником со сторонами, соотносящимися как 2:3.

Диапазон рабочих параметров стенда: число Рейнольдса от 10000 до 50000; предельное статическое давление равно 150 кПа; массовый расход изменяется от 50 до 250 н.м³/ч; максимальное избыточное давление равно 0,03 МПа; температура потока на входе от +10 до +35°C.

Вся информация с датчиков выводилась с помощью программируемого логического контроллера (PLC) компании OVEN PLC160-24.U. Этот контроллер имеет мощные вычислительные ресурсы (процессор RISC на базе ядра ARM-9, 32 бита, 180 МГц). Сбор первичных данных из рабочего участка и управление вентилятором также осуществлялись с помощью контроллера. Измерения температуры проводятся в двух точках потока с помощью датчиков Т.р/р-420-K11-

3. Все датчики имеют выходные токи 4-20 мА и подключаются к семи аналоговым входам контроллера. Датчики потока IRVIS-RS4-ULTRA-PP используют интерфейс RS-485 для передачи показаний потока, давления и температуры и подключаются к соответствующему последовательному порту на контроллере.

Для получения качественной информации о потоке, необходимо провести визуализацию течения среды. В данном исследовании для изучения и описания характеристик воздушного потока была использована визуализация методом лазерного ножа. На рис. 2 и 3 представлены, соответственно, схема и фотография эксперимента по визуализации течения. Твердотельный импульсный Nd:YAG лазер использовался для проецирования «лазерного ножа».

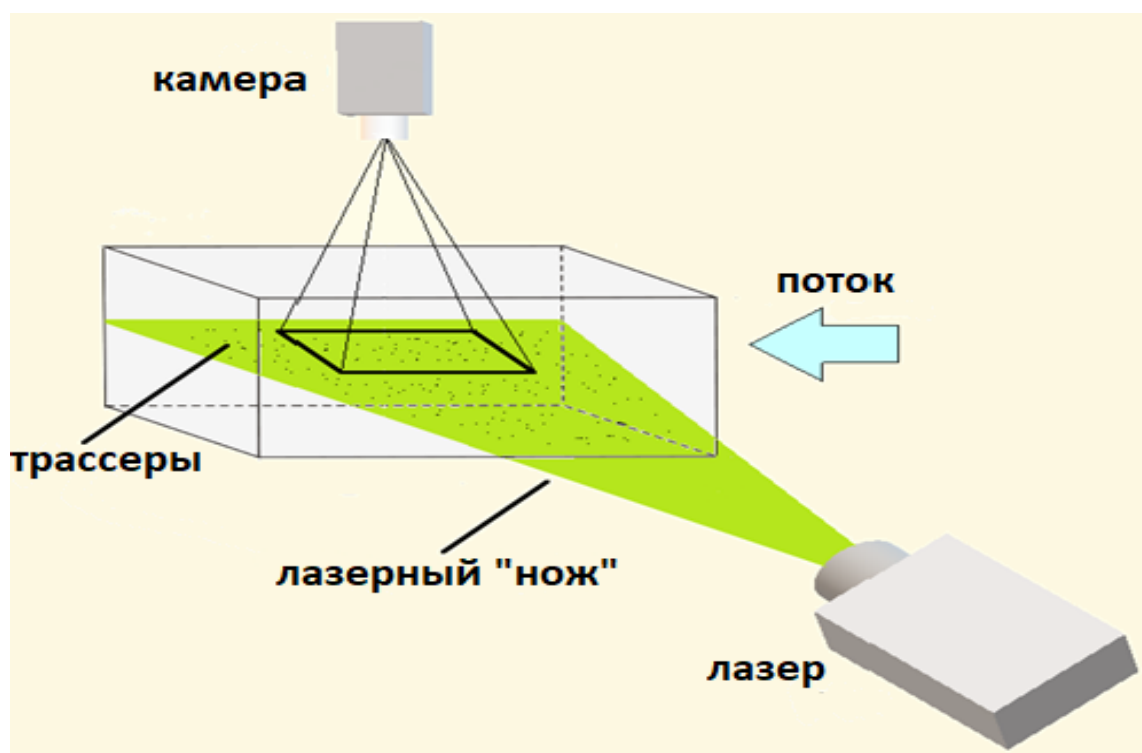


Рис. 2. Схема визуализации течения методом PIV

Основные параметры лазера: толщина лазерного ножа не превышала 1 мм, длина волны 532 нм, мощность энергии в импульсе 120 мДж и частота срабатывания 0,5 Гц. Камера фокусировалась в плоскости светового сечения. Экспозиция камеры и мощность лазера регулировались для получения наилучших характеристик яркости и контрастности. В исследуемый газовый поток добавлялись трассеры при помощи дымогенератора. Фотографии по визуализации потока, полученные во время эксперимента, обрабатывались и анализировались для получения информации о турбулентной структуре потока.

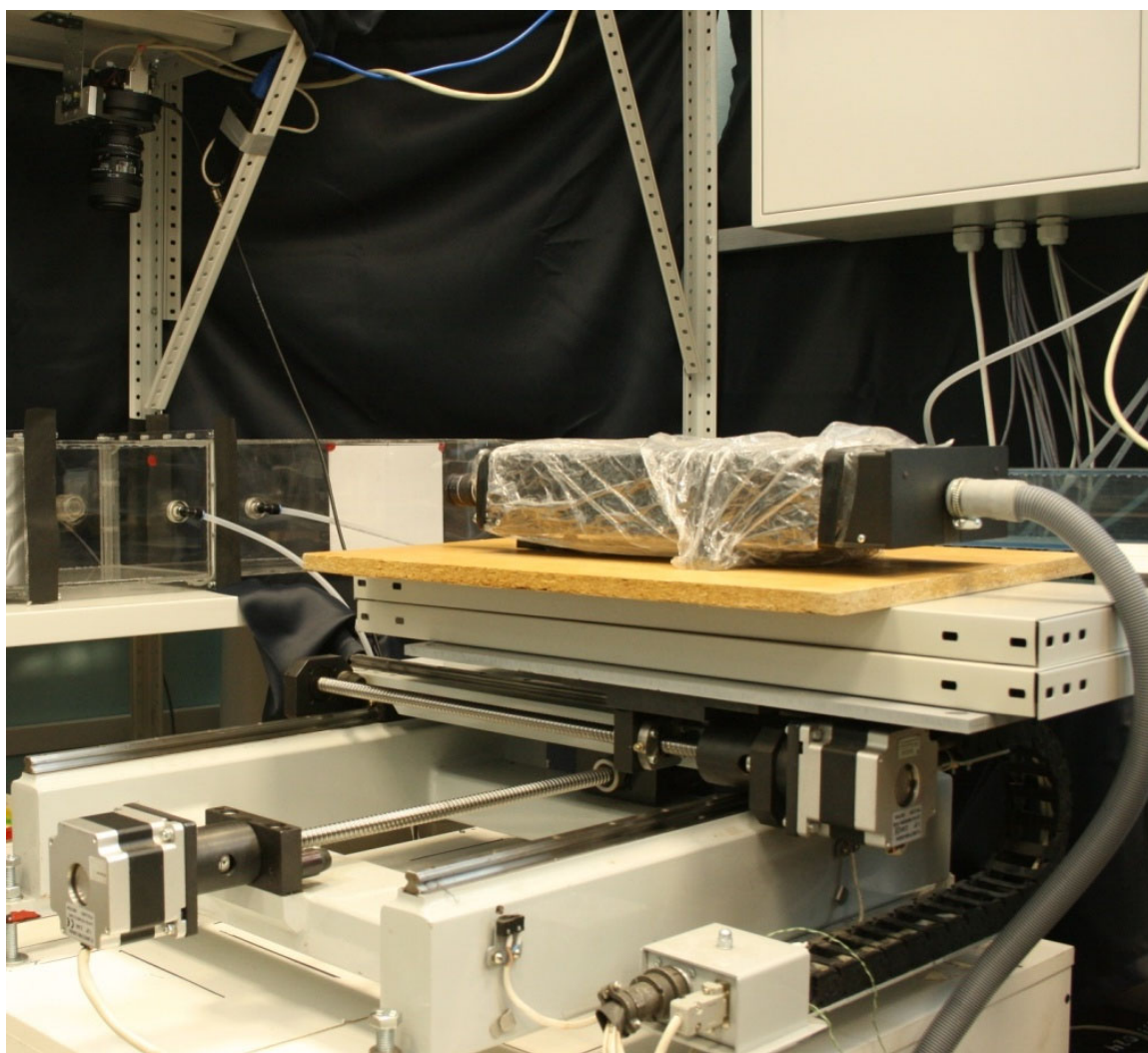


Рис. 3. Фотография установки: 1 - цифровая камера, установленная над секцией контроля; 2 - устройство поворотное; 3 – Nd:YAG лазер, установленный на координатно-перемещающее устройство

Результаты

На двух участках – поворотном колене и участке перед катализатором (рис. 4) – были получены результаты визуализации распределения газовых потоков.

Картины, полученные с помощью визуализации, показали турбулентный режим течения с формированием вихревых структур в потоке. На рис. 4, б было зафиксировано образование зон обратного тока с отрывом пограничного слоя, которые влекут за собой нестационарные дорожки Кармана. Число Рейнольдса на участке равнялось $Re = 50\ 000$, а степень турбулентности $I = \Delta U / U$ составляла 23 %.

С помощью визуализации течения были вычислены характерные размеры вихря, которые составляют около 5-9 мм. Формирование крупномасштабных вихрей влияет на структуру массопереноса и, следовательно, на эффективность работы каталитического картриджа [3].

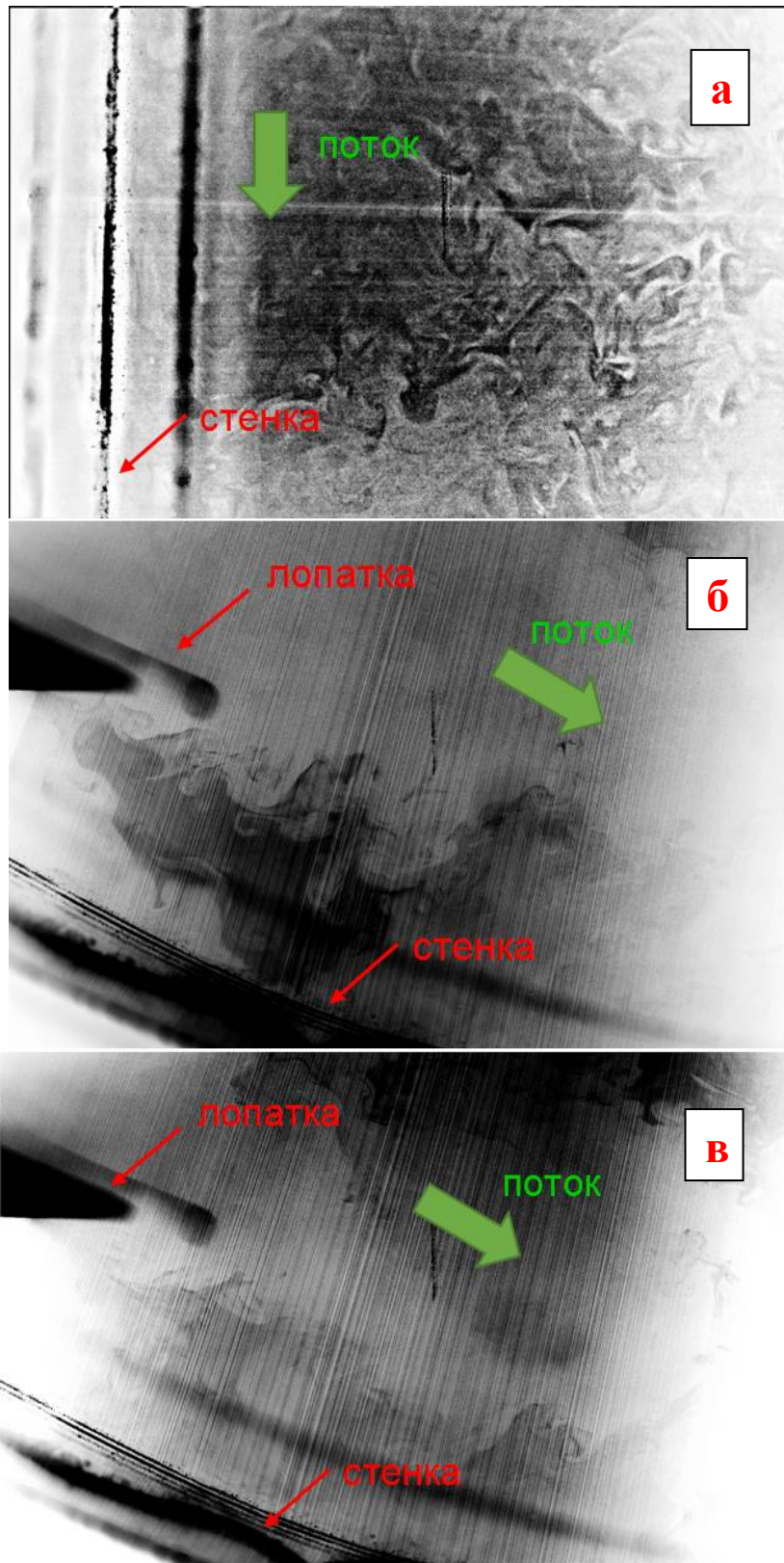


Рис. 4. Фотография визуализации потока: участок перед катализатором (а), поворотный участок (б, в)

Заключение

Таким образом, использование теневых и интерференционных методов визуализации течения позволяет получить качественную информацию о структуре потока и его параметрах. Визуализация течения также позволяет определить оптимальные параметры работы технических устройств, что может привести к улучшению их эффективности и экономии энергии.

В данном исследовании использование методов визуализации течения позволило получить информацию о структуре турбулентного потока в рабочем участке и на участках перед катализатором. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации работы каталитического картриджа и повышения его эффективности. Кроме того, результаты визуализации могут быть использованы для уточнения и проверки результатов численного моделирования течения в данной системе.

Благодарности

Экспериментальное исследование кинематических свойств потока проводилось по государственному контракту с ИТ СО РАН

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Белоусов П.П., Белоусов П.Я. Оптические методы исследования потоков / Отв. ред. В.Е. Накоряков. – Новосибирск: Сиб. университет. изд-во, 2003. – 418 с.
2. Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry. – Berlin: Springer-Verlag. - 2001. - 269 p.
3. Меледин В.Г. Информационная оптоэлектронная диагностика. Наука и инновационные промышленные технологии / Отв. редактор член-корр. РАН С.В.Алексеев. – Новосибирск: Академиздат, 2015. – 173 с.
4. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков / под ред. В.А. Фабриканта. – М.: Издательство МЭИ, 1990. – 288 с.
5. Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте. - Новосибирск: НГУ, 2009. – 450 с.

© С. В. Какаулин, В. И. Полякова, М. Х. Правдина, И. К. Кабардин, 2023