

Развитие метода лазерной доплеровской анемометрии для верификации численных расчетов при исследовании движения газа в управляемом поворотно-расходящемся потоке

С. В. Какаулин¹, И. К. Кабардин^{1}, М. Р. Гордиенко¹*

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

Аннотация. Разработан метод лазерной доплеровской анемометрии для проведения экспериментальных исследований по управлению поворотно-расходящимся потоком, проведена детальная диагностика усредненных и турбулентных характеристик. Проведено численное моделирование и сравнение с экспериментальными данными на основе известных современных моделей турбулентности, проведен сравнительный анализ моделей. Полученные результаты могут быть полезны для определения пределов применимости различных моделей турбулентности.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, верификация численных расчетов, поворотно-расширяющийся поток

Development of laser doppler anemometer method for calculation verification in study of gas motion in controlled turning-and-diverging flow

S. V. Kakaulin¹, I. K. Kabardin^{1}, M. R. Gordienko¹*

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. The laser-Doppler anemometry method was developed for experimental studies on control of turning-and-diverging flow have been carried out; detailed diagnostics of averaged and turbulent characteristics have been made. Numerical modeling and comparison with experimental data based on known up-to-date turbulence models have been performed; comparative analysis of models has been done. The findings may be useful for determination of applicability limits of turbulence models.

Keywords: laser-Doppler anemometry, verification of numerical calculations, rotary-expanding flow

Введение

Фундаментальная научная проблема управления поворотно-расходящимся потоком с целью оптимизации массообмена возникает в механике, химии и катализе. Эффективность массопереноса зависит от распределения потока по каналу и мелкомасштабной турбулентности в реагирующем потоке. Потоки реагентов в действующих аппаратах и реакторах реализуются в сложной геометрии, с поворотными и расширяющимися участками, в которых происходит разделение потоков и образуются пристенные струи и зоны обратного потока. Возник-

новение зон рециркуляции с отрывом пограничного слоя приводит к образованию дорожек Кармана. Эти эффекты имеют тенденцию увеличивать гидродинамическое сопротивление потоку и ухудшать равномерность турбулентного массопереноса. Для точного описания массопереноса при использовании численных методов необходимо верифицировать и актуализировать модели турбулентности.

Целью этой работы было развитие метода лазерной доплеровской анемометрии и проведение исследований, чтобы понять, какие модели турбулентности могут адекватно описать турбулентный поток в поворотно-расширяющихся каналах. Выбор модели был основан на сравнении результатов моделирования и экспериментальных данных. Для расчета установок, имеющих в своей конфигурации поворотно-расходящиеся потоки, появляется большое число вычислительных моделей. Чтобы принять решение, необходимо провести сравнительный анализ моделей турбулентности. При этом возникают проблемы. Данные методы, используются для конкретного типа потока. Все методы включают в себя определенное количество констант, которые определяют расчет расхода и берутся из эксперимента. Поворачивающийся и расходящийся поток имеет место во многих практических приложениях, но он не относится к каноническим потокам. Применение представленных выше моделей турбулентности не гарантирует точности расчетов, и необходима экспериментальная проверка.

В данной работе приведены высокоточные экспериментальные исследования вращающихся и расходящихся потоков с целью проверки существующих моделей турбулентности. Результатом этой работы должны стать рекомендации по диапазону применимости различных моделей турбулентности для моделирования турбулентного теплообмена в вращающихся и расходящихся потоках.

Методы и материалы

Исследователи начиная с классических работ О. Рейнольдса, столкнулись с фундаментальной проблемой выбора подходящей модели турбулентности для интенсификации турбулентного массопереноса [1, 2]. Частое возникновение турбулентного движения в задачах интенсификации массообмена подчеркивает актуальность, обусловленную исключительной сложностью турбулентности как физического явления. Определение пределов применимости моделей турбулентности существенно зависит от возможностей компьютера и практических потребностей. Для задач массопереноса с управлением потоком в поворотно-расходящихся потоках могут быть применены описанные ниже вычислительные методы.

Метод моделирования больших вихрей (LES) [3, 4] эффективно используется для расчета поворотных течений. Так как описание характеристик изотропности и однородности мелкомасштабной турбулентности с использованием подсеточной модели, гораздо точнее, в отличие от моделирования полного спектра турбулентных колебаний, преимущество метода очевидно. Минусом данного метода являются большие затраты мощности на вычисление из-за значимых трехмерных нестационарных вычислений на сетках, имеющих большое количе-

ство элементов, хотя реализация этого метода требует гораздо меньших вычислительных ресурсов по сравнению с прямым численным моделированием.

Турбулентный теплообмен в поворотно-расходящихся потоках моделируется с применением полуэмпирических моделей турбулентности, за основу которых берутся усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса [5, 6]. Далее будут рассмотрены некоторые из базовых моделей для замыкания уравнения Рейнольдса.

Алгебраические модели [7] основаны на модели Прандтля и прямом расчете величины вихревой вязкости. Стоит упомянуть модели для турбулентного массопереноса в поворотно-расходящихся потоках с использованием одного уравнения для турбулентной вязкости.

Среди таких моделей можно выделить модель Спаларта–Аллмараса [7]. Данная модель предусматривает одно дифференциальное уравнение для турбулентной вязкости с «высоким числом Рейнольдса», которое находится в алгебраической связи с турбулентной вязкостью. Для этой модели легче определить пределы применимости при моделировании турбулентного теплообмена в поворотно-расходящихся потоках.

Для моделирования турбулентного теплообмена в вращающихся и расходящихся потоках особого упоминания заслуживают полуэмпирические модели турбулентности с двумя уравнениями для турбулентной вязкости.

Одним из них является модель $k-\epsilon$ в [8]. Использование более грубых сеток является преимуществом моделей по отношению к моделированию поворотно-расходящихся потоков; к недостаткам можно отнести применение определенных функций стенки.

Моделирование турбулентного теплообмена в вращающихся и расходящихся потоках также может опираться на модели $k-\omega$ [9]. Данные модели успешно решают задачи с пристенной турбулентностью без применения специальных функций, что положительно показывает их в отличие от моделей $k-\epsilon$ при моделировании поворотно-расходящихся потоков. С другой стороны модели такого класса чувствительны к граничным условиям во внешнем потоке.

Модели переноса напряжений по Рейнольдсу [10] заслуживают особого внимания. Приведенные модели опережают модели турбулентной вязкости в возможности расчета различных потоков. Однако полученное решение может быть физически неприемлемым. Кроме того, модели связаны со значительными затратами вычислительных мощностей и сложностями с конвергенцией.

Применение полуэмпирических моделей турбулентности показало, что создание универсальной модели турбулентности для расчета турбулентного теплообмена в поворотно-расходящихся потоках вряд ли возможно. Ни одна из существующих моделей не является универсальной; все модели имеют несколько констант, влияющих на результаты моделирования турбулентного массопереноса, значения этих констант подобраны экспериментально. Поэтому при использовании этих моделей необходимо провести высокоточный эксперимент для определения пределов применимости, в которых модель адекватно описывает турбулентное течение.

В поворотно-расходящемся потоке для изучения области применимости моделей турбулентности в задачах интенсификации тепло- и массообмена были созданы испытательный участок (рис. 1) и аэродинамический измерительный стенд для его проверки (рис. 2). Испытательная секция включает в себя следующие функциональные блоки: входной участок, два участка для расширения изгиба и два участка для управления потоком.

Воздух подавался в испытательную секцию через вентилятор, затем поток газа проходит через расходомер. Температура и давление в потоке измерялись датчиками температуры и давления соответственно.

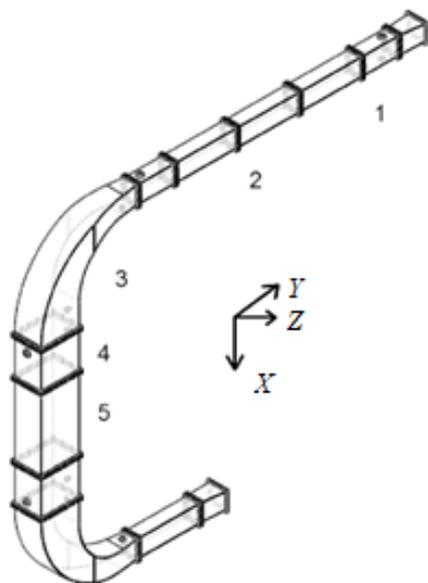


Рис. 1. 3D-модель рабочей секции:

1 – входное отверстие; 2 – участок перед поворотным устройством, 3 – поворотное устройство, 4 – участок управления, 5 – участок перед вторым поворотным устройством

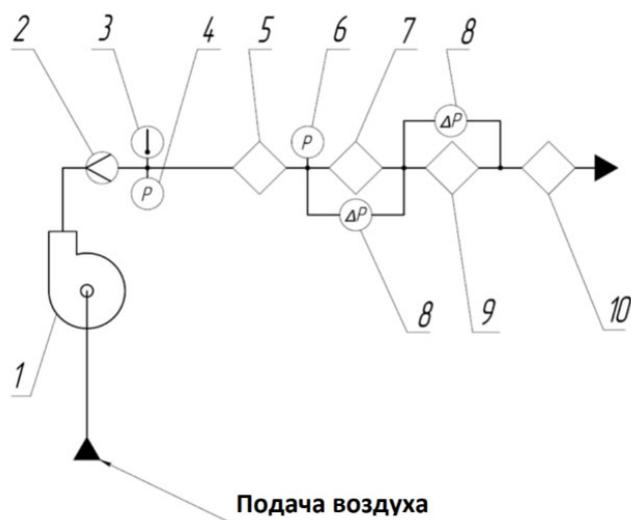


Рис. 2. Структурная схема стенда:

1 – вентилятор, 2 – расходомер, 3 – датчик температуры, 4 и 6 – преобразователь избыточного давления, 5 – участок перед изгибом, 8 – датчик перепада давления, 9 – смеситель, 7 и 10 – поворотное устройство, 9 – прямой участок после первого поворотного устройства

Измерение гидравлического сопротивления потоку на основе перепада давления на поворотном устройстве и после секции с каталитическим картриджем, определяемого с помощью датчиков перепада давления.

Габаритные размеры испытательной секции составляли 600×3000×2300 мм. Соотношение площадей выходного и входного поперечных сечений составляло 5 к 1. Поперечное сечение после первого изгиба представляло собой прямоугольник с соотношением сторон 2:3. Угол отклонения потока составлял 90°. Рабочей средой был воздух. Предельное статическое давление составляло 150 кПа. Диапазон температур входного потока составлял +10... +35°C. Массовый расход составлял 50, 100, 150, 200 и 250 н.м³/ч.

Аэродинамический стенд содержал комплекс контрольно-измерительных приборов для измерения и регистрации параметров, а также вывода информации на дисплей компьютера. Программируемый логический контроллер обеспечивал запись данных с датчиков и управление стендом.

Аэродинамические характеристики потока измерялись с использованием современных бесконтактных оптических методов диагностики двухфазных потоков: методов лазерной доплеровской анемометрии (LDA) и цифровой велосиметрии изображений частиц (PIV) [11–14]. Генератор дыма высевал трассирующие пули в поток. Порции образующегося дыма поступали в 20-литровый контейнер, из которого под внешним давлением дым подавался в вентилятор, а затем в трубу. Таким образом, поток внутри экспериментального стенда был равномерно засеян частицами индикатора с течением времени, что позволило измерять расход методами LDA и PIV.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования течения в поворотно-расходящемся устройстве проводились с использованием метода лазерной доплеровской анемометрии. Полученные данные позволили проанализировать распределение скорости потока и степени неравномерности газового потока. Измерения проводились в трех поперечных сечениях (рис. 3): на входе, перед первым витком и в измерительной части перед каталитическим картриджем после первого витка. На рисунках 4 и 5 представлены результаты измерения профилей скорости для поперечных сечений 1 и 2. Схема структуры потока показывает, что на входе расположение профиля скорости все еще было неустойчивым, но распределение скоростей выравнивалось на изгибе, и профиль скорости стал равномерным.

Структура потока после участка изгиба макетной платы показана на рис. 6 и 7. Результаты измерений показывают, что профиль скорости неоднороден. Наблюдается образование сильной пристенной струи и зоны обратного течения. Зона рециркуляции появляется из-за резкого поворота потока.

Результаты моделирования

Выполнена трехмерная модель стенда для проведения численного моделирования. При моделировании были учтены все конструкционные параметры стенда. Математическая модель содержала 1 500 000 вычислительных ячеек. Использовалась нерегулярная сетка (рис. 8). У стены решетка была прямоугольной формы. Радиальный размер ячейки варьировался от 0,1 до 0,2 мм. В ядре потока сетка была треугольной. Скорость потока с экспериментально измеренным заданным профилем скорости, изменяющимся в зависимости от массового расхода (100-250 н.м³/ч), была установлена в качестве граничных условий на входе в вычислительную область.

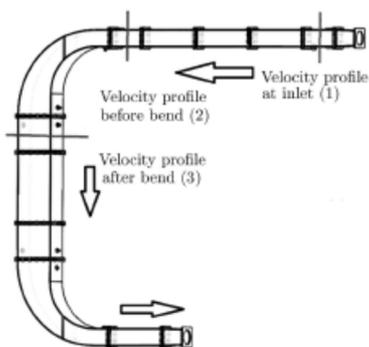


Рис. 3. Схема измерения профилей скорости

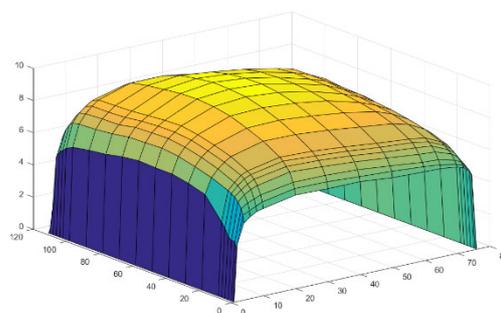


Рис. 4. Распределение составляющей осевой скорости в поперечном сечении 1, при расходе $250 \text{ н.м}^3/\text{ч}$

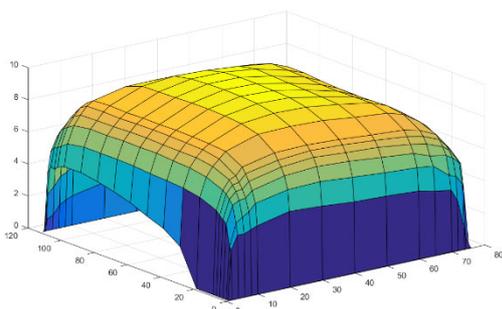


Рис. 5. Распределение осевой составляющей скорости в поперечном сечении 2 при массовом расходе $250 \text{ н.м}^3/\text{ч}$

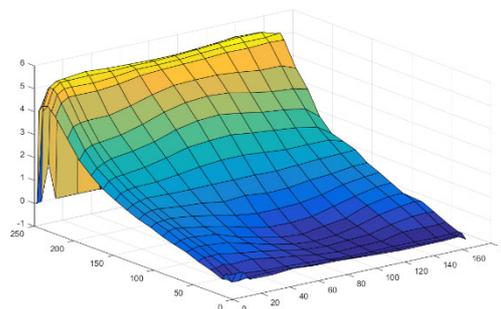


Рис. 6. Распределение осевой составляющей скорости в поперечном сечении 3 при расходе $250 \text{ н.м}^3/\text{ч}$

На стенки газораспределительного устройства было наложено условие отсутствия скольжения, т.е. нулевая скорость у стенки. На выходной границе расчетной области было наложено условие статического давления, равного нормальному атмосферному давлению 10^5 Па .

Расчеты были выполнены с заданным расходом на входе в модель стенда. В качестве выходных данных было получено распределение скоростей в поперечном сечении 3 (рис. 3). Расчеты проводились с использованием различных моделей турбулентности: моделей $k-w$, $k-l-w$ и $k-e$, алгебраической модели, модели переноса напряжений Рейнольдса и модели LES. Эмпирические константы всех моделей не изменились и были приняты равными значениям по умолчанию. На рис. 7 показаны рассчитанные и экспериментально измеренные распределения скоростей.

Как видно из рисунков, расчеты чувствительны к выбору модели турбулентности. Модель переноса напряжений Рейнольдса дает наилучшее качественное соответствие. Все остальные модели, основанные на гипотезе Буссинеска о турбулентной вязкости, хуже описывают экспериментальные результаты для области разделенных потоков. Для области потоков без разделения все модели хорошо согласуются с экспериментальными результатами, как было указано ранее [12] (рис. 8).

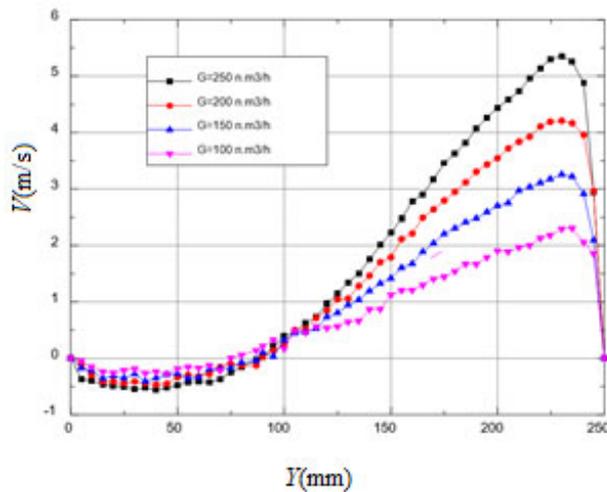


Рис. 7. Экспериментальное распределение продольной скорости в сеч. 3

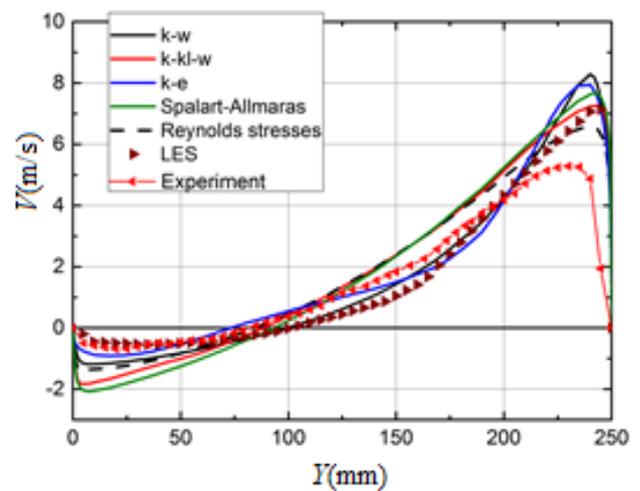


Рис. 8. Сравнение эксперимента и расчета для расхода 200 н.м³/ч

Кроме того, модель переноса напряжений Рейнольдса с высокой точностью предсказывает ширину зоны обратного потока (рис. 10).

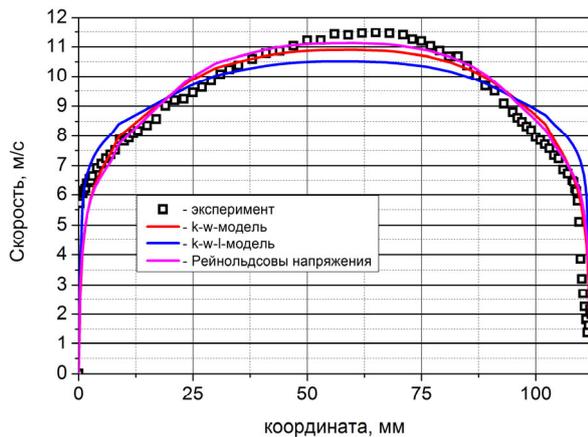


Рис. 9. Распределение продольной скорости в сечении 1. Сравнение расчета и эксперимента

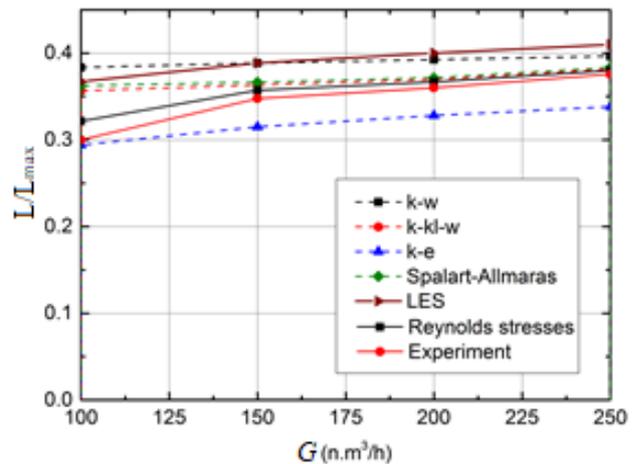


Рис. 10. Ширина зоны рециркуляции в поперечном сечении после поворотного устройства для разных расходов

Средняя погрешность расчета составила не более 5%. Из экспериментальных данных видно, что относительная ширина зоны рециркуляции принимает значения от 0,24 до 0,36. Для модели переноса напряжений Рейнольдса ширина зоны рециркуляции принимает значения, близкие к экспериментальным. Для других моделей турбулентности ширина зоны рециркуляции отличается от экспериментальных значений.

Заключение

Для изучения характеристик турбулентного массообмена был создан экспериментальный стенд. Для анализа турбулентных течений использовался метод лазерной доплеровской анемометрии. Была разработана математическая модель, на которой проводилось моделирование течения в турбулентном поворотно-расходящемся потоке. Усредненные уравнения были замкнуты с использованием различных полуэмпирических моделей турбулентности. Проведено сравнение результатов расчетов методами вычислительной гидродинамики с данными экспериментальных исследований. Было показано, что наилучшее качественное соответствие обеспечивается моделью переноса напряжений Рейнольдса, не основанной на гипотезе Буссинеска.

Благодарности

Исследование течения проводилось в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121032200034-4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Garbaruk, A.V., Strelets, M.H., Travin, A.K., and Shur, M.L., *Sovremennye podkhody k modelirovaniyu turbulentnosti (Current Approaches to Turbulence Modeling)*, St. Petersburg: Politekh. Univ., 2016.
2. Reynolds, O., *On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion*, Philos. Trans. R.Soc., 1895, vol. 186, pp. 123–161.
3. Ferziger, J.H., *Recent Advances in Large Eddy Simulation*, in Engin. Turbul. Model. Exp., Rodi, W. and Bergeles, G., Eds., Elsevier, 1996, pp. 163–176.
4. Panov, D.O., Ris, V.V., and Smirnov, E.M., *Eddy-Resolving Numerical Simulation of Three-Dimensional Turbulent Flow in a Channel with a Sharp Turn by 180 Degrees*, Nauch.-Tekh. Vedomosti SPbGPU. Fiz.-Mat. Nauki, 2017, vol. 10, no. 4, pp. 21–33; DOI: 10.18721/JPM.10402.
5. Spalart, P.R., *Editorial: RANS Modeling into a Second Century*, Int. J. CFD, 2009, vol. 23, no. 4, pp. 291–293.
6. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*, Longman Scientific and Technical, 1995.
7. Spalart, P.R. and Allmaras, S.R., *A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamics Flows*, La Recherche Aerospaciale, 1994, no. 1, pp. 5–21.
8. Launder, B.E. and Spalding, D.B., *The Numerical Computation of Turbulent Flows*, Comput. Meth. Appl. Mech. Engin., 1974, vol. 3, pp. 269–289.
9. Wilcox, D.C., *Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models*, AIAA J., 1988, vol. 26, no. 11, pp. 1299–1310.
10. Launder, B.E., Reece, G.J., and Rodi, W., *Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure*, J. Fluid Mech., 1975, vol. 68, no. 3, pp. 537–566.
11. Meledin, V.G., *Informatsionnaya optoelektronnaya diagnostika. Nauka i innovatsionnye promyshlen-nye tekhnologii (Information Optoelectronic Diagnostics. Science and Innovative Industrial Technologies)*, Alekseenko, S.V., Ed., Novosibirsk: Akademizdat, 2015.
12. Balzhinimaev, B.S., Kabardin, I.K. et al. *Computational Analysis of Gas Flow in Gas Distributor Breadboard for Creating Efficient Devices to Remove Volatile Organic Compounds*, J. Eng. Therm., 2019, vol. 28, no. 3, pp. 372–380.