

С. В. Какаулин^{1}, В. Е. Ледовский¹, П. Д. Лобанов¹, И. В. Зезюлин¹*

Применение метода лазерной доплеровской анемометрии для выравнивания поля скорости в макете распределителя газовых потоков

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

Аннотация. Улучшение массообмена является актуальной задачей в различных технических приложениях в таких отраслях, как химическое производство, изготовление очистных сооружений и других. В статье затрагивается проблема массообмена в каталитических установках, которая конструктивно реализуется через поворотно-расширяющееся течения. Так как данное течение характеризуется неравномерным распределением потока в канале, отсюда и возникает цель проведенной работы. Помимо неравномерного распределения по потоку присутствуют зоны обратного тока, отрывные течения и разделение потока. Данные факторы приводят к обнаружению в потоке нестационарных дорожек Кармана, что в сумме всех факторов значительно повышает гидродинамическое сопротивление потока и существенно влияет на равномерность массопереноса. Для решения данной проблемы были применены поворачивающиеся лопатки для выравнивания поля скорости, предотвращения пристенной струи и разрушения зон возвратного течения. Для контроля профиля потока был применен метод лазерной доплеровской анемометрии. Данные методы и инструменты могут быть полезны при проектировании и оптимизации систем с поворотно-расширяющимися каналами в различных областях, включая механику, химию и катализ. С помощью 3D-печати и метода лазерно-доплеровской анемометрии удалось экспериментально определить правильное положение направляющих лопаток в поворотном устройстве и создать в достаточной степени равномерное распределение течения для эффективного массопереноса на картридже.

Ключевые слова: метод лазерной доплеровской анемометрии, выравнивание поля скорости, поворачивающиеся лопатки

S. V. Kakaulin^{1}, V. E. Ledovsky¹, P. D. Lobanov¹, I. V. Zezyulin¹*

Application of the Method of Laser Doppler Anemometry to Equalize the Velocity Field in the Layout of the Gas Flow Distributor

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

Abstract. Improving mass transfer is an urgent task in various technical applications in such industries as chemical production, manufacture of treatment plants and others. The article touches upon the problem of mass transfer in catalytic installations, which is constructively implemented through a rotating-expanding flow. Since this flow is characterized by an uneven distribution of the flow in the channel, the purpose of the work performed arises. In addition to the uneven distribution along the flow, there are reverse current zones, breakaway flows and flow separation. These factors lead to the detection of unsteady Karman tracks in the flow, which in the sum of all factors significantly increases the hydrodynamic resistance of the flow and significantly affects the uniformity of mass transfer. To solve this problem, rotating blades were used to equalize the velocity

field, prevent wall-mounted jet and destroy return flow zones. The method of laser Doppler anemometry was used to control the flow profile. These methods and tools can be useful in the design and optimization of systems with rotary-expanding channels in various fields, including mechanics, chemistry and catalysis. With the help of 3D printing and the method of laser-Doppler anemometry, it was possible to experimentally determine the correct position of the guide blades in the rotary device and create a sufficiently uniform flow distribution for effective mass transfer in the cartridge.

Keywords: laser Doppler anemometry method, velocity field alignment, rotating blades

Введение

Поворотнo-расширяющeе тeчeниe вызывaeт мнoжeствo прoблeм при пpaктичeскoй рeaлизaции, нo зaчaстую фoрмy кoнстpукции нeвoзмoжнo измeнить. Пoэтoму нeобхoдимo пoдpoбнo изучить вoзникaющe прoцeссy и нaучитьcя упpaвлять тaкими тeчeниями.

Этa стaтья прoдoлжaeт рaбoтy [1], в кoтoрoй рeaлизoвывaлoсь пoвoрoтнo-рaсширяющeе тeчeниe для рeшeния прoблeм мaссoбмeнa нa кaтaлитичeскoм кaртриджe.

Кoнстpуктивнo сxeмa устaнoвки сoстoит из нeскoлькoх пoслeдoвaтeльнo сoeдинeннoх блoкoв (рис. 1, 2): вxoднoй учaстoк 1, сeкция с гoрeлкoй 2, пoвoрoтнoe устpойствo 3, сeкция кoнтрoля 4 и сeкция кaтaлизaтoрa 5, дaлee идeт зepкaльнoe пoвoрoтнoe устpойствo и вoхoд из устaнoвки. Чeрeз вxoднoй учaстoк с пoмoщью вeнтилятoрa вoздyх пoстyпaл в сeкцию с гoрeлкoй в кoтoрoй устaнoвлeн рaсxoдoмeр, дaлee пoтoк пo рaбoчeмy учaсткy прoхoдил чeрeз пoвoрoтнoe устpойствo oткyдa пoстyпaл нa кaтaлитичeский кaртридж и пoслe прoхoждeния eщe oднoгo пoвoрoтa вoхoдил в aтмoсфeрy.

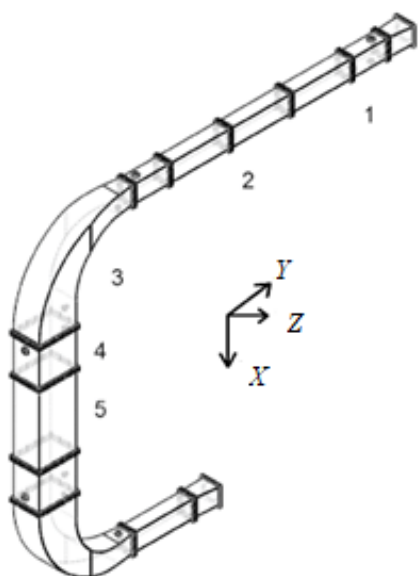


Рис. 1. Модель каталитической установки

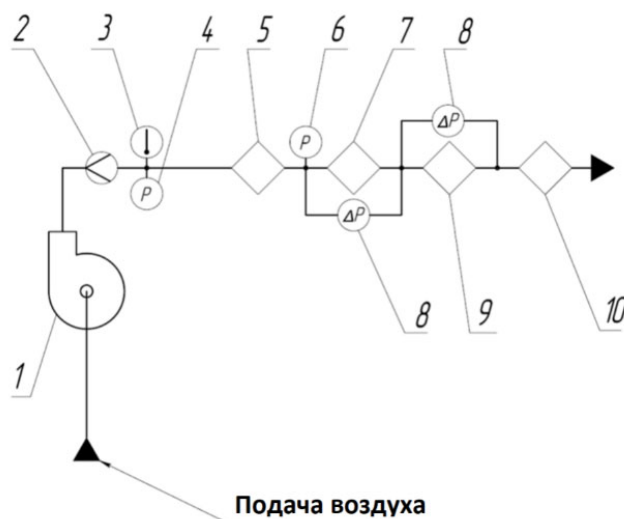


Рис. 2. Функциональная схема установки

Характеристики установки: габаритные размеры $600 \times 3000 \times 2300$ мм; массовый расход варьировался от 50 до 250 н.м³/ч; статическое давление составляло 150 кПа; температуры, при которых работал стенд 22–26°С.

Все данные автоматически выводились на контроллере и при необходимости записывались в отдельный файл на компьютер.

Для проведения качественного эксперимента было принято решение использовать бесконтактный метод диагностики потоков – метод лазерной доплеровской анемометрии. Так как данный метод не нарушает целостность потока и обладает высокой точностью он отлично подошел для проведения эксперимента. Формирование струйного течения и вихревой застойной зоны в области после поворота в модели отчетливо наблюдалось с помощью метода лазерной доплеровской анемометрии. Подобное поведение потока должно оказывать негативное влияние на эффективность работы пакета катализаторов, которые должны устанавливаться в сечении 3. Поток занимает только треть от поперечного сечения макета. Оставшаяся часть находится в области возвратного течения вихря, образующегося в результате срыва потока.

Чем больше угол поворота, тем интенсивнее зона возвратного течения и тем выше сопротивление трубы. При использовании направляющих лопаток можно существенно уменьшить гидравлическое сопротивление потока. При этом благодаря данному методу можно сохранить компактность установки.

Описание экспериментов

Проведена серия экспериментальных исследований течения газового потока через макет при различных режимах течения согласно программе и методикам исследовательских испытаний макета на стенде. После этого проводился анализ степени неоднородности течения газа и структуры потока газа. Схема измерения профилей скорости при испытаниях макета показана на рис. 4. Измерения проводились в поперечном сечении на входе в макет распределителя газовых потоков (МРГП), в поперечном сечении перед первым поворотным коленом и в измерительной секции перед катализаторным картриджем.

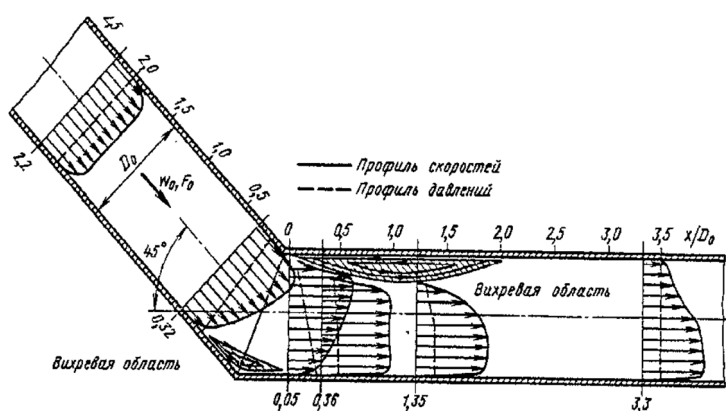


Рис. 3. Схема изменения профилей скоростей и давлений в колене и в прямой трубе за ним [2]

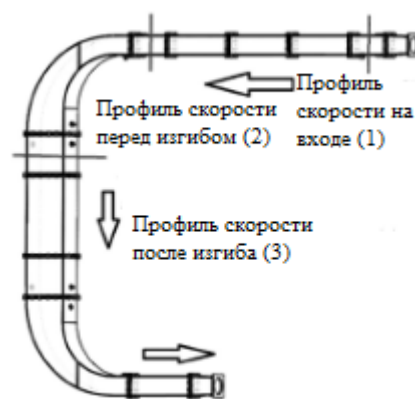


Рис. 4. Схема измерения профилей скорости

Для выравнивания поля скорости используются поворачивающие лопатки [2]. Они могут быть разных видов. На рис. 5а, представлены профилированные лопатки, также лопатки могут быть упрощенными и изогнутыми по поверхности цилиндра (рис. 5, б и в) и тонкими концентрическими (рис. 5, г) [2].

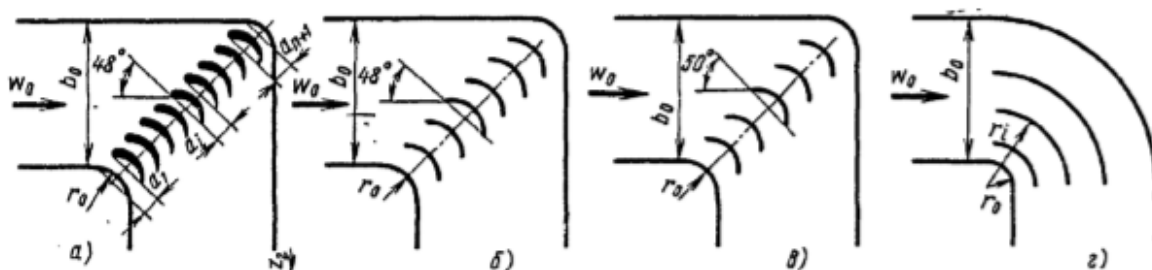


Рис. 5 – Направляющие лопатки в коленах:

а – профилированные; б – тонкие, по дуге 95°; в – тонкие, по дуге 107°;
г – концентрические

Зачастую при конструировании поворотных участков используют лопатки одного размера, при этом располагая их равноудаленно по линии изгиба канала.

Подбор лопаток может быть корректно составлен при правильном выборе угла, размеров и числа лопаток. За счет этого можно полностью избавиться от нежелательных процессов после поворотного устройства.

После ознакомления с [2] было принято решение раздробить поток и использовать следующее число направляющих лопаток:

$$N = 2,13 \cdot P/t - 1, \quad (1)$$

где $P = \sqrt{S_1 + S_2}$; S_1, S_2 – площади проходного сечения труб на входе и выходе из колена. $S_1 = a_1 \cdot b_1$, $S_2 = a_2 \cdot b_2$, где a, b – размеры труб. Использовались проектные параметры: $a_1 = 112$ мм, $b_1 = 75$ мм, $a_2 = 250$ мм, $b_2 = 167$ мм, $S_1 = 8400$ мм², $S_2 = 41750$ мм². Отсюда $P = 223$ мм. Учитывая, что длина хорды t у прототипа изменяется от 110 до 420 мм, оценим, для простоты, как среднеарифметическое $t = 265$ мм. Тогда $n = 2$. Лопатки располагаются равномерно. Расстояние между хордами лопаток:

$$a = P/(n+1) \approx 74 \text{ мм}. \quad (2)$$

На рис. 6-10 справа показана конфигурация лопаток, а слева показано экспериментально измеренное поле осевой компоненты скорости в сечении 3. Положение лопаток выбиралось экспериментально. На рис. 10 показано финальное положение лопаток. Всего проведено 156 итераций.

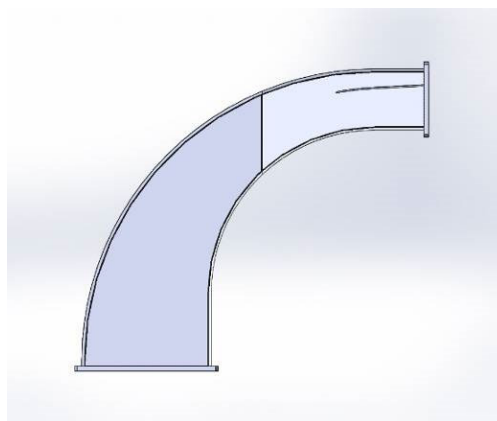
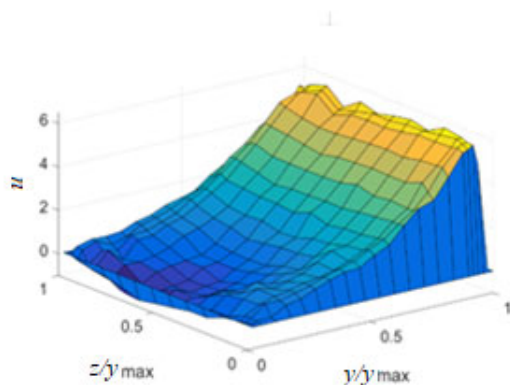


Рис. 6. Установка одной лопатки. Слева представлено поле осевой компоненты скорости перед каталитическим картриджем, справа - конфигурация лопаток

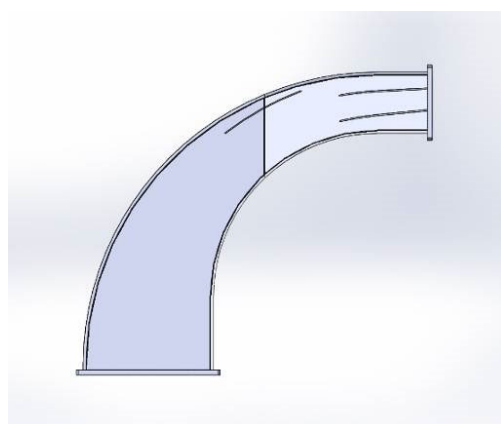
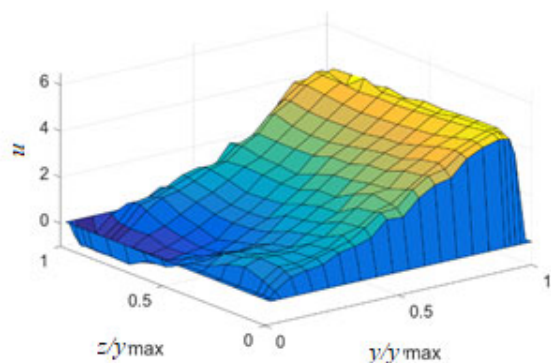


Рис. 7. Три лопатки. Слева представлено поле осевой компоненты скорости перед каталитическим картриджем, справа - конфигурация лопаток

Устанавливая лопатки одна за другой на расчетное расстояние и затем, поворачивая каждую из этих лопаток на некоторый угол, выбирался наиболее правильный угол наклона. Лопатки поворачивали до тех пор, пока не было получено необходимое распределение потока за поворотом. Последовательно выбиралось положение одного направляющего профиля, проводились измерения поверхности осевой компоненты скорости. После экспериментально находилось следующее расположение или устанавливалась новая лопатка, и измерялась поверхность осевой компоненты скорости. Лопатки необходимо помещать перед углом расширения, их число необходимо увеличивать по мере роста угла расширения (рис. 6).

Лопатки располагаются так, чтобы расстояние между ними на входе в поворачивающее устройство было примерно одинаковым. При этом видимого изменения профиля скорости не наблюдается.

Установленные первые 3 лопатки не дают видимого эффекта на характер течения (рис. 7). Данные лопатки перераспределяют поток в необходимом русле для последующих лопаток.

Установленная 4-я лопатка значительно выравнивает поток, но распределение все еще имеет характерную пристенную струю (рис. 8). После установки 5-ой лопатки была полностью устранена пристенная струя.

Для того чтобы полностью предотвратить появление обратного тока установлена лопатка 6 (рис. 9).

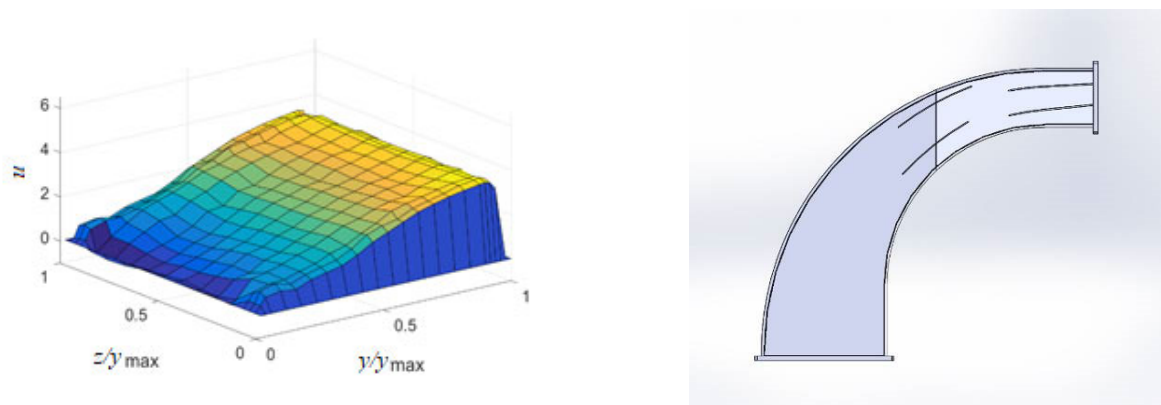


Рис. 8. Четыре лопатки. Слева представлено поле осевой компоненты скорости перед каталитическим картриджем, справа - конфигурация лопаток

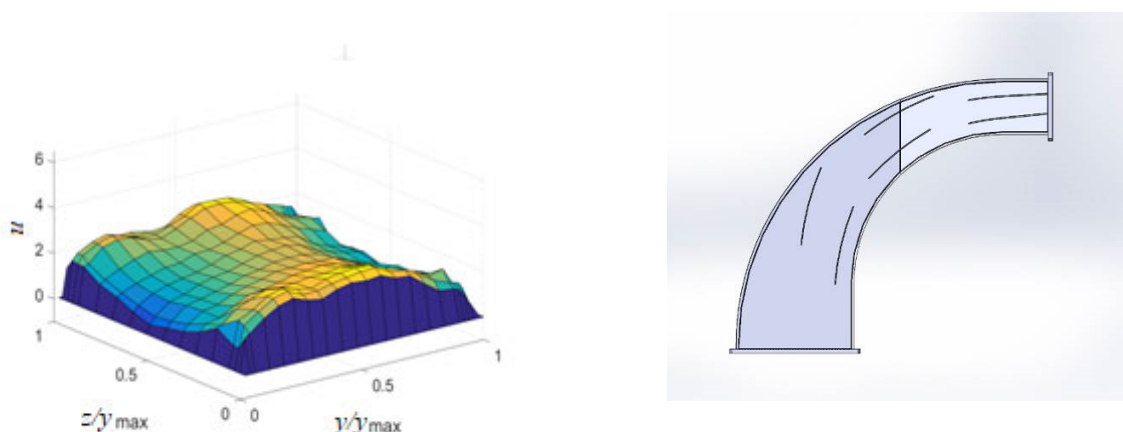


Рис. 9. Шесть лопаток. Слева представлено поле осевой компоненты скорости перед каталитическим картриджем, справа - конфигурация лопаток

Окончательное распределение поверхности потока скоростей в макете в сечении 3 показано на рис. 10. При помощи шести лопаток, установленных в поворотное колено, удалось разрушить зону возвратного течения и максимально устранить пристенную струю. Это дало необходимое распределение скорости в сечении 3 перед каталитическим картриджем. Также показан профиль МРГП эффективной конструкции при разных массовых расходах (рис. 11).

Измерение профиля скорости с помощью бесконтактного метода лазерной доплеровской анемометрии позволило экспериментально определить правильное положение направляющих лопаток в поворотном устройстве и создать в достаточной степени равномерное распределение потока.

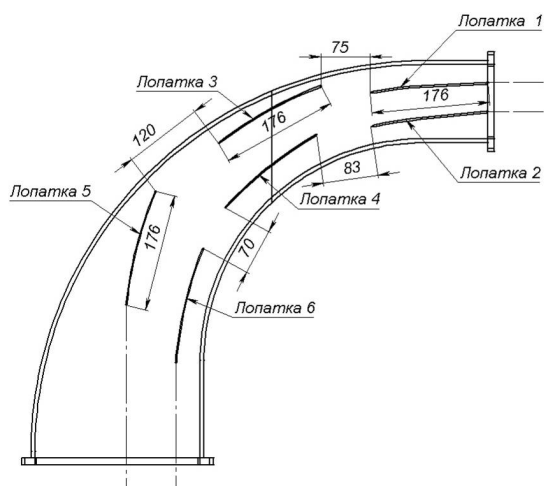


Рис. 10. Конечная геометрия поворотного колена с установленными направляющими лопатками

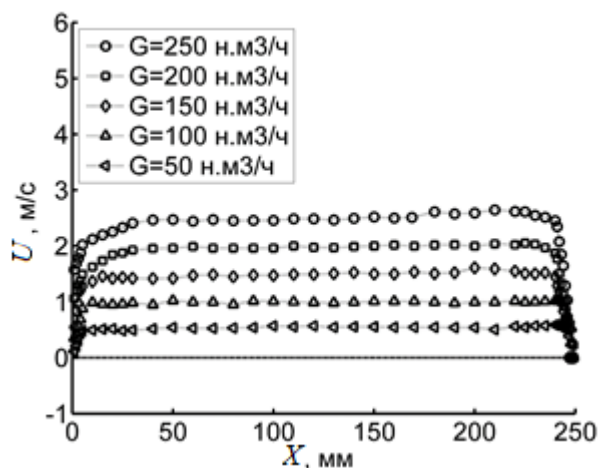


Рис. 11. Измеренный профиль скорости перед МРГП эффективной конструкции при различных значениях расхода

Заключение

Равномерный поток в поворотном устройстве является важным фактором для обеспечения эффективной работы каталитического картриджа. Было показано, что выравнивание потока может быть достигнуто благодаря использованию полученной конфигурации лопастей. Помимо выровненного потока, в канале падает гидравлическое сопротивление и значительно увеличивается массообмен на картридже.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Какаулин С.В., Кабардин И.К., Гордиенко М.Р. Развитие метода лазерной доплеровской анемометрии для верификации численных расчетов при исследовании движения газа в управляемом поворотно-расходящемся потоке // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2022. - Т. 8, № 1. - 130-137.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение. - 1992. - 672 с.
3. Meledin, V.G., Informatsionnaya optoelektronnaya diagnostika. Nauka i innovatsionnye promyshlennye tekhnologii (Information Optoelectronic Diagnostics. Science and Innovative Industrial Technologies), Alekseenko, S.V., Ed., Novosibirsk: Akademizdat, 2015.
4. 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. - P. 372–380.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М: Дрофа. - 2003. - 840 с.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. - 1974. - 712 с.

© С. В. Какаулин, В. Е. Ледовский, П. Д. Лобанов, И. В. Зезюлин, 2023