

Смешение водорода с воздухом в закрытой емкости

В. М. Бочарников, В. В. Володин, Н. К. Денцель и А. Е. Ельянов
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: vlad@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2024 г.

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования смешения водорода с воздухом при инъекции водорода в неподвижный воздух. В процессе экспериментов проводилось измерение концентрации водорода и скорости газового потока по объему. В различных экспериментах менялись следующие параметры: инжектируемый газ, объемный расход инжектируемого газа, начальное и конечное давление в емкости инжектора. Измерено время сокращения разности концентрации водорода по объему сосуда ниже 0.6% об. Получена эмпирическая формула, связывающая время смешивания с концентрацией водорода, скоростью заполнения водородом и конечным давлением смеси. Результаты показывают, что в зависимости от выбора указанных параметров время приготовления однородной смеси может варьироваться от нескольких минут до более, чем суток.

1. ВВЕДЕНИЕ

Приготовление газовых смесей является важным этапом физического эксперимента в областях теплофизики, физики горения и взрыва, физико-химической гидродинамики. Невоспроизводимость приготовления смеси при проведении повторяющихся экспериментов приводит к заметному разбросу экспериментальных данных [1]. При проведении большого количества экспериментов с меняющимися параметрами, смесь готовят в лаборатории. Одним из способов смешения является динамическое смешение [2, 3]. При правильной организации потоков такой смеситель обеспечивает стабильное и качественное перемешивание газов. Недостатком подобного способа является необходимость длительной работы такого смесителя с неизменными расходами компонентов для обеспечения хорошего смешения. Использование движущихся перемешивающих устройств сильно усложняет конструкцию за счет необходимости крепления перемешивающего элемента внутри емкости, организации безопасного привода и герметизации внутреннего объема. Обычно такие устройства имеют объем в несколько литров. Для проведения лабораторных экспериментов чаще требуется объем смеси в несколько десятков литров с неизменным составом для всей серии экспериментов [4], поэтому смесь предварительно готовится в отдельном баллоне [5, 6].

При приготовлении смеси в баллоне без дополнительных перемешивающих устройств на однородность получаемой смеси влияет последовательность заполнения баллона, скорость подачи компонентов и время выдержки после заполнения. Выявлению закономерностей, влияющих на скорость перемешивания газов, посвящена данная работа.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, состоящая из емкости объемом 40 л, средств вакуумирования и заполнения и средств измерения скорости потока и концентрации (рисунки 1). Емкость представляет собой стальной баллон внутренним диаметром 190 мм длиной 1400 мм. Верхняя и нижняя стенки емкости — сферические. Отверстие для ввода инжектируемого газа сделано по оси емкости в верхней стенке. Диаметр инжектора равен 6 мм.

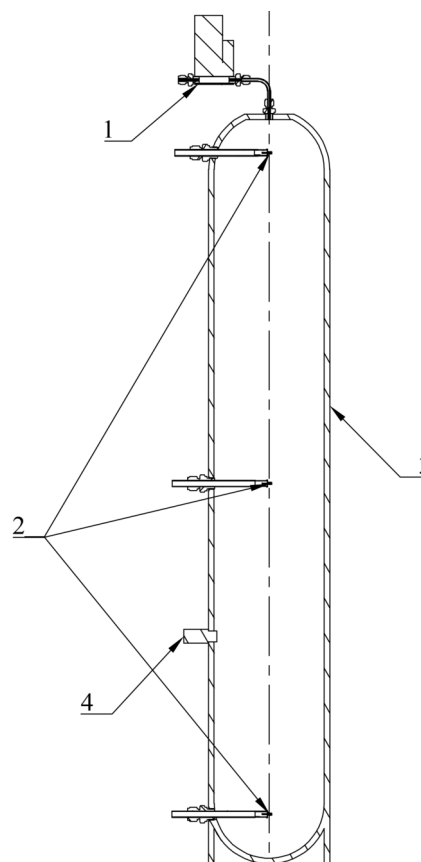


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки. 1 — контроллер расхода газа Bronkhorst F201A/V, 2 — термокондуктометрические сборки для измерения скорости потока и концентрации водорода, 3 — баллон, 4 — датчик статического давления.

На высотах 100, 700 и 1300 мм от инжектора в боковой стенке сделаны отверстия для установки датчиков скорости и концентрации водорода в смеси.

Вакуумирование проводилось с помощью вакуумного насоса VALUE VRD-4 до давления 10 Па. Начальное заполнение вакуумированной емкости воздухом или водородом, в зависимости от постановки эксперимента, контролировалось по образцовому манометру и ограничивалось с помощью регулировочного вентиля.

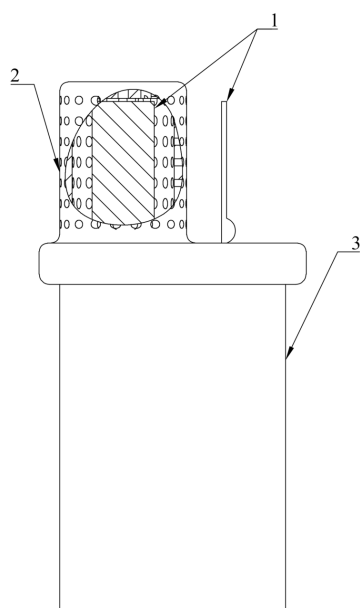


Рисунок 2. Эскиз сборки из двух термокондуктометрических датчиков. 1 — термокондуктометрические датчики IST FS7, 2 — перфорированный колпачок, 3 — корпус сборки.

Через 10 минут, после остановки потоков, в емкость подавался второй компонент смеси с заданным расходом 5, 25 или 50 нормальных литров в минуту. Расход и объем инжектируемого газа задавались с помощью контроллера расхода Bronkhorst F201A/V [7].

Измерение скорости потока и концентрации водорода производилось сборками из двух термокондуктометрических датчиков IST FS7 [8]. Сборка состоит из открытого датчика и датчика, закрытого перфорированным колпачком (рисунок 2). Как показано в работах [9, 10], при известном давлении в емкости, сигналы с двух датчиков позволяют одновременно измерять скорость потока и концентрацию водорода в месте их установки. Точность измерения концентрации водорода составляла 0.6% об., т.е. при достижении такой разности концентраций между верхним и нижним датчиками смесь считалась однородной.

Давление газа в емкости контролировалось с помощью датчика статического давления PT1200-A-5-B-0.5CN1G с точностью до 0.05 ата.

Сигналы датчиков скорости, концентрации, давления и потока смеси регистрировались с помощью двух осциллографов Rigol DS 1054Z, подключенных к компьютеру с непрерывной передачей и записью сигналов с дискретизацией 100 мс. Такой подход позволял вести непрерывную регистрацию параметров до 3 суток. Полученные записи преобразовывались в значения скорости и концентрации с использованием зависимостей, представленных в работе [9].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования проводились эксперименты с инъекцией водорода в воздух. Объемный расход инжектируемого газа составлял 5, 25 и 50 нормальных литров (н.л.) в минуту. Начальное давление рассчитыва-

лось из конечного давления и концентрации водорода в смеси. Конечное давление составляло от 1 до 5 атм абсолютных (ата), концентрация водорода — от 10 до 60% об.

При инъекции водорода в воздух емкость изначально заполнялась воздухом. Минимальное давление составляло 0.4 ата при приготовлении 1 ата смеси с содержанием водорода 60% об. Максимальное — 4.5 ата при приготовлении 5 ата смеси с содержанием водорода 10% об. Скорость инжектируемого газа на срезе сопла зависит от объемного расхода и давления в емкости. При составлении 5 ата смеси с объемным расходом 5 н.л./мин к окончанию заполнения скорость падает до 0.6 м/с. При составлении 1 ата смеси с содержанием водорода 60% об с объемным расходом 50 н.л./мин в начале заполнения скорость максимальна и составляет 70 м/с.

На рисунке 3 представлены зависимости концентрации водорода в трех контрольных точках от времени при составлении 5 ата смеси с содержанием водорода 30% об. с объемным расходом 5 н.л./мин. Скорость струи водорода меняется от 0.84 до 0.6 м/с. Глубина проникновения струи водорода в воздух не превышает 17 см [11], т.е. основной механизм смешения — молекулярная диффузия. Время поступления водорода в емкость составляет 12 минут. Видно медленное смешение, концентрация по высоте выравнивается за 12 часов.

На рисунке 4 представлены зависимости концентрации водорода в трех контрольных точках от времени при составлении 3 ата смеси с содержанием водорода 30% об. с объемным расходом 50 н.л./мин. Скорость струи водорода меняется от 13.9 до 9.8 м/с. Рассчитанная глубина проникновения струи водорода в воздух превышает высоту емкости, т.е. основной механизм смешения в момент заполнения — гидродинамическое перемешивание. Время поступления водорода в емкость составляет 43 с. Концентрация по высоте выравнивается за 6.5 часов.

Таблица 1. Время перемешивания при инъекции водорода в воздух, ч.

Режим	5 л/мин	25 л/мин	50 л/мин
1 ата, 10% об.	15	12.5	9
3 ата, 10% об.	19.5	16.5	14
5 ата, 10% об.	>24	20.5	19
1 ата, 20% об.	6		6
3 ата, 20% об.	12	10	9
5 ата, 20% об.	18	12.5	12
1 ата, 30% об.	6	6	4.5
3 ата, 30% об.	9	7.5	6.5
5 ата, 30% об.	12	9	8.5
1 ата, 40% об.	3		4
3 ата, 40% об.		6	5.5
5 ата, 40% об.	12	8	7
1 ата, 50% об.	3.5	3	3
3 ата, 50% об.	6.5	5	
5 ата, 50% об.	9.5	8	6
1 ата, 60% об.	3.5		
3 ата, 60% об.		4.5	4
5 ата, 60% об.	8	5.5	

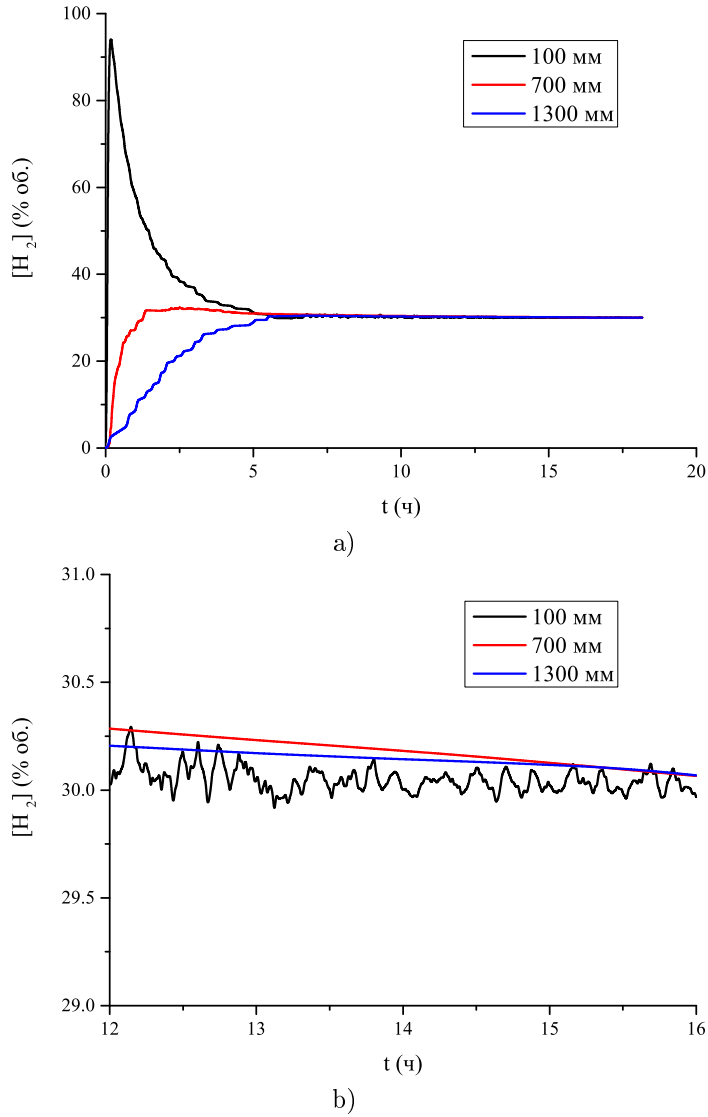


Рисунок 3. (a) — Зависимости концентрации водорода от времени при инъекции водорода в 3.5 ата воздуха с объемным расходом 5 н.л./мин в сечениях 100, 700 и 1300 мм от инжектора; (b) — те же зависимости вблизи точки, когда разность концентраций падает до 0.6% об.

3.1. Инжекция водорода в воздух

Полученный набор экспериментальных значений может быть аппроксимирован степенными зависимостями от концентрации и расхода газа и линейной от давления. Сначала из экспериментальных данных были построены степенные зависимости времени смешения от концентрации водорода вида $t = k[H_2]^n$ для каждого давления и расхода. Значения показателя степени n при аппроксимации для разных условий менялись от -0.75 до -0.63 . Среднее значение показателя степени при концентрации водорода составляет -0.7 . С этим показателем степени были получены коэффициенты k для каждого давления и расхода. Затем полученные пары коэффициентов k и расходов газа были аппроксимированы степенными зависимостями вида $k = mq^l$. При первой аппроксимации были получены значения показателя степени l : -0.16 , -0.14 и -0.12 . Среднее значение составляет -0.14 . Полученные пары значений коэффициентов m и давлений аппроксимированы линейной за-

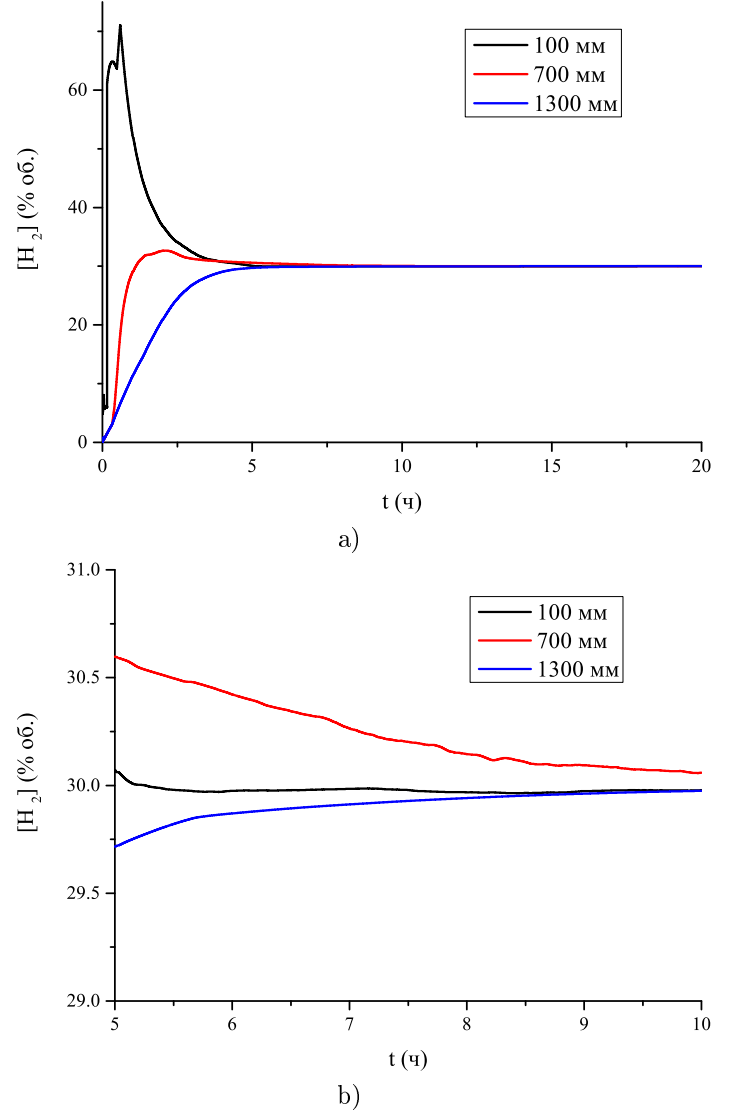


Рисунок 4. (a) — Зависимости концентрации водорода от времени при инъекции водорода в 2.1 ата воздуха с объемным расходом 50 н.л./мин в сечениях 100, 700 и 1300 мм от инжектора; (b) — те же зависимости вблизи точки, когда разность концентраций падает до 0.6% об.

висимостью. В итоге получена эмпирическая формула зависимости времени перемешивания от концентрации водорода, скорости заполнения баллона и давления:

$$t \approx [H_2]^{-0.7} q^{-0.14} (21.5P_f + 62.5), \quad (1)$$

где $[H_2]$ — концентрация водорода в смеси в % об., q — расход водорода в н.л./мин, P_f — абсолютное давление смеси в атм (ата).

3.2. Обсуждение

Рассмотрим предельный случай, когда гидродинамическое перемешивание отсутствует. В начальный момент времени водород и воздух занимают части объема, пропорциональные требуемой концентрации. Давление газа постоянно по всему объему, скорость равна нулю. Выравнивание концентрации водорода в емкости в отсутствие конвективных потоков происходит по механизму молекулярной диффузии. Диффузионный поток

пропорционален градиенту концентрации:

$$J \sim -\frac{D\Delta c}{L}, \quad (2)$$

где D — коэффициент взаимной диффузии водорода с воздухом, Δc — разность концентраций в интересующих точках, L — расстояние между этими точками.

Разность концентраций меняется со временем следующим образом:

$$\frac{d\Delta c}{dt} \sim -\frac{2D\Delta c}{L^2}. \quad (3)$$

Интегрируя, получим зависимость разности концентраций от времени смешения:

$$\frac{\Delta c}{\Delta c_0} \sim \exp\left(-\frac{D}{L^2}t\right), \quad (4)$$

или времени, требуемого для достижения требуемой разности концентраций:

$$t \sim -\frac{L^2}{D} \ln\left(\frac{\Delta c}{\Delta c_0}\right). \quad (5)$$

Табличное значение коэффициента взаимной диффузии водорода с воздухом при атмосферном давлении $D = 6.34 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Начальная разность концентраций 100% об., конечная разность — 0.6% об., что соответствует точности измерения используемых датчиков. Расстояние между крайними точками 1.2 м, время смешения 32.3 часа.

С ростом давления коэффициент диффузии линейно падает [12], соответственно, пропорционально будет расти время, необходимое для достаточного смешения. При давлении смеси 3 ата оно составит 4 суток, при давлении 5 ата — 7 суток.

Результаты экспериментов показывают, что наименее эффективный способ приготовления водородно-воздушной смеси — инжекция водорода в воздух через инжектор, расположенный в верхней части емкости. Низкая плотность водорода приводит к торможению струи за счет сил плавучести и малого импульса. Сравним потенциальную энергию объема водорода над объемом воздуха в предположении четкой границы между ними и кинетическую энергию струи водорода за все время заполнения емкости.

При составлении смеси с конечным давлением P_f и концентрацией водорода c_f при инжектировании водорода в воздух начальное давление воздуха будет равно $P_0 = P_f(1 - c_f)$. Парциальные объемы воздуха и водорода составят:

$$V_{air} = (1 - c_f)V, \quad V_{H2} = c_f V, \quad (6)$$

где V — объем сосуда.

Поскольку в данной задаче постоянен объемный расход водорода при нормальных условиях, т.е. массовый расход, время инжекции можно вычислить следующим образом:

$$t = \frac{P_f V}{q P_n} c_f, \quad (7)$$

где q — объемный расход водорода, P_n — атмосферное давление.

Потенциальная энергия объема водорода над объемом воздуха составит

$$E_p = (m_{H2} - m_{air}) g \Delta h, \quad (8)$$

где m_{H2} — масса водорода, m_{air} — масса воздуха, g — ускорение свободного падения, Δh — разность высот центров масс.

Подставив значения масс получим:

$$E_p = \frac{LV P_f g}{2 P_n} (\rho_{H2} c_f - (1 - c_f) \rho_{air}), \quad (9)$$

где L — высота емкости, ρ_{H2} — плотность водорода при нормальных условиях, ρ_{air} — плотность воздуха при нормальных условиях.

Кинетическая энергия струи за все время заполнения может быть вычислена следующим образом:

$$E_k = \int_0^t \frac{\rho_{H2} dV v^2}{2}, \quad (10)$$

где v — скорость струи водорода.

Скорость струи водорода меняется с повышением давления в емкости:

$$v = \frac{4q P_n V}{\pi d_0^2 ((1 - c_f) P_f V + P_n q t)}, \quad (11)$$

где d_0 — диаметр инжектора водорода.

После интегрирования и подстановки времени заполнения получим полное значение кинетической энергии струи:

$$E_k = \frac{8 \rho_{H2} q^2 P_n V c_f}{\pi^2 d_0^4 P_f (1 - c_f)}. \quad (12)$$

Кинетическая энергия растет квадратично с расходом газа и падает обратно пропорционально конечному давлению смеси, т.к. при постоянном массовом расходе с повышением противодавления скорость падает. Кинетическая энергия струи расходуется на проникновение струи водорода в объем, заполненный воздухом, в условиях противодействия сил плавучести. А также на диссипацию в мелких вихрях, т.е. турбулентное смешение [13]. После диссипации кинетической энергии движения смешение происходит по механизму молекулярной диффузии.

На рисунке 5 представлены зависимости кинетической и обратной величины потенциальной энергии газов в емкости от объемного расхода при нормальных условиях для смеси 30% об. при различных значениях конечного давления.

Из рисунка 5 видно, что при приготовлении смеси с концентрацией водорода 30% об. кинетическая энергия инжектируемого газа превышает потенциальную энергию системы из двух газов в поле силы тяжести при скорости наполнения 25 н.л./мин для давления 1 ата, 82 н.л./мин для давления 3 ата, для давления 5 ата скорость наполнения превышает 100 н.л./мин. То есть, при инжекции водорода в воздух смешение определяется в основном молекулярной диффузией газов.

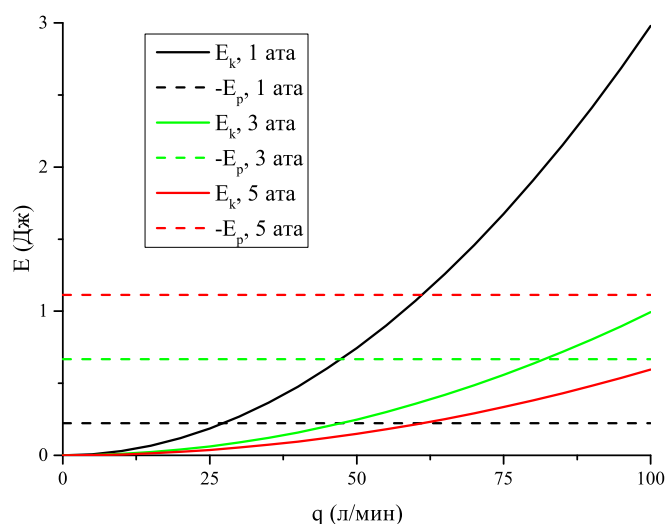


Рисунок 5. Зависимости кинетической и обратной величины потенциальной энергии газов в емкости от объемного расхода при нормальных условиях для смеси 30% об. при значениях конечного давления 1, 3 и 5 ата.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования смешения водорода с воздухом в емкости с давлением до 5 ата при инъекции водорода в воздух. Получены значения времени перемешивания при конечной концентрации водорода в смеси от 10 до 60% об., скорости заполнения 5, 25 и 50 н.л./мин и конечном давлении смеси 1, 3 и 5 ата. Получена эмпирическая формула зависимости времени перемешивания от концентрации водорода, скорости заполнения баллона и давления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №23-29-00267.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Essmann S, Markus D, Grosshans H and Maas U 2020 *Combust. Flame* **211** 44–53
2. Колесниченко И Н, Платонов И А, Новикова Е А и Муханова И М 2017 *Сорб. и хром. процессы* **17** 378–387
3. Тупоносов Ф В, Артемов В И, Яньков Г Г и Дедов А В 2024 *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки* **114** 115–132
4. Elyanov A E, Gavrikov A I, Golub V V, Mikushkin A Y and Volodin V V 2022 *Process Saf. Environ. Prot.* **164** 50–56
5. Володин В В, Голуб В В и Ельянов А Е 2022 *Вестник ОИВТ РАН* **7** 56–65
6. Дракон А В и Еремин А В 2024 *Вестник ОИВТ РАН* **13** 24–29
7. 2023 *EL-FLOW Select series Thermal Mass Flow Meters and Controllers for Gases* (Ruurlo, Netherlands: Bronkhorst High-Tech B.V.)
8. 2021 *Innovative Sensor Technology IST AG. Thermal Mass Flow Sensor FS7. Application Note* (Ebnat-Kappel, Switzerland: IST AG)
9. Бочарников В М, Володин В В, Голуб В В, Денцель Н К и Ельянов А Е 2024 *Уч. зап. физ. фак. МГУ* 2430901
10. Василяк Л М, Ветчинин С П, Печеркин В Я и Яненко Ю Б 2019 *Прикл. физ.* **2** 60–66
11. Абрамович Г Н (ред.) 1984 *Теория турбулентных струй* (М.: Наука)
12. Ландау Л Д, Ахиезер А И и Лифшиц Е М 1965 *Курс общей физики: Механика. Молекулярная физика.* (М.: Наука)
13. Абрамович Г Н, Крашенинников С Ю, Секундов А Н и Смирнова И П 1974 *Турбулентное смешение газовых струй* (М.: Наука)