

## Исследование рабочих процессов в устройствах смешения в вихревом потоке

© А.Н. Писаревский, Н.Н. Кулаков,  
А.В. Чернышев, О.В. Белова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Создание многокомпонентных газовых сред широко применяется для приготовления эмульсий и суспензий и получения гомогенных сред с контролируемой концентрацией. В данной статье дана оценка перспектив их использования, проблемы разработки смешивающих устройств. Приведен пример схемы системы смешения в вихревом потоке. Представлены схема и методика проведения эксперимента по оценке эффективности данного устройства. Разработана математическая модель для проведения численных расчетов с распределенными параметрами для определения характера течения в устройстве вихревого смешения.*

**Ключевые слова:** система смешения, вихревой поток, экспериментальная установка.

**Введение.** Конструкция систем смешения вихревого потока представляет собой Г-образный канал (рис. 1). Его торец, находящийся на меньшей стороне, открыт и является входом. На стенках более длинной части канала имеются отверстия, являющиеся выходом. Данная система ставится в проточный тракт потребителя так, что плоскость ее входа перпендикулярна направлению движения потока, набегающего из проточного тракта. Набегающий поток свободно затекает во вход камеры смешения. Вторая среда вводится в систему через специальный подвод и уносится основным потоком. Процесс проходит при наличии вихревого течения в камере смешения, что обеспечивает более полное перемешивание компонентов.

Данные устройства отличаются простотой в исполнении и высокой надежностью в эксплуатации благодаря отсутствию движущихся частей. При наличии сложного течения физические параметры в каждой точке рабочего объема и, как следствие, расходы смеси через выходы будут различаться. Профилирование геометрии канала камеры дает возможность управлять количеством смеси, проходящим через каждый выход. Это позволяет получить управляемое поле концентраций за системой смешения. Данный эффект используется, например, в химических реакторах и двигателях. Другие устройства, выполняющие те же функции [1, 2], не способны подавать малые

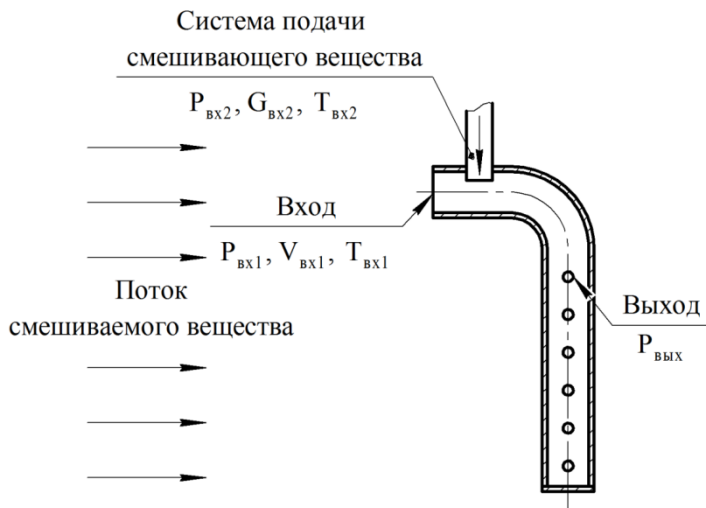


Рис. 1. Конструкция системы смешения

расходы при двухфазном смешении или конструктивно сложны, что сильно ограничивает их применение. Аналогичные системы смешения, использующие вихревое течение [3–5], не способны выдавать контролируемое поле концентраций смеси.

Но рабочие процессы, протекающие в этих устройствах, мало изучены.

**Экспериментальные исследования.** Для подтверждения рабочих характеристик системы смешения требуется измерение поля концентраций компонентов на выходе из устройства. В данной работе исследуется двухфазное смешение (газ—жидкость).

В последнее время для исследования аэрозольных потоков все большее применение стали находить бесконтактные оптические методы. Они базируются на изменении свойств пучка света, прошедшего облако аэрозоля, и функциональной связи этих изменений с физическими параметрами частиц данного облака. Одновременно с разработкой упомянутых методик активно развивались математические модели для обработки и получения достоверных результатов и увеличения полноты информации, полученной из эксперимента. Математические модели послужили также и для дальнейшего развития самих методик, позволяя использовать в них менее уникальную аппаратуру.

Достоинства этих методов:

- 1) отсутствие влияния измерительного инструмента на исследуемый объект;
- 2) быстрота получения экспериментальных данных;
- 3) сравнительная простота постановки эксперимента при трудности организации непосредственных измерений.

Все эти достоинства оптических методов оказались привлекательными при исследовании процессов распыливания жидкости [6–8].

В настоящей работе рассматривается методика, основанная на измерении рассеяния и ослабления света, отраженного от облака распыленной жидкости [9].

Схемы установки показаны на рис. 2 — 4. На рис. 2 показана система подачи смешиваемого компонента. Компрессор 1 создает требуемое давление в ресивере 3. Газ подается по трубопроводу 2, проходит через шиберный затвор 4. Затем поток выравнивается через входной участок 5, проходит диффузор 6 и попадает на вход смесителя 7.

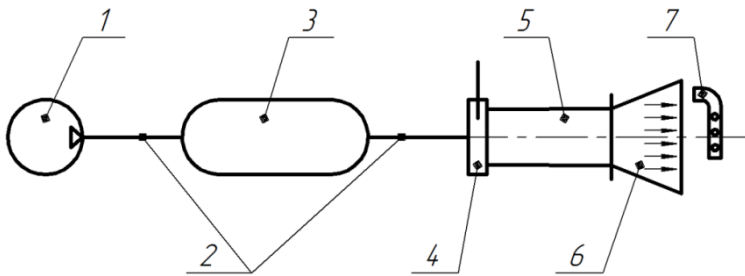


Рис. 2. Газодинамическая схема системы подачи смешиваемого компонента

Схема подачи смешивающего компонента представлена на рис. 3. При открытии клапана 3 жидкость, откачиваемая насосом 2, из бака 1 с заданным давлением подается в смеситель 4 через форсунку 5.

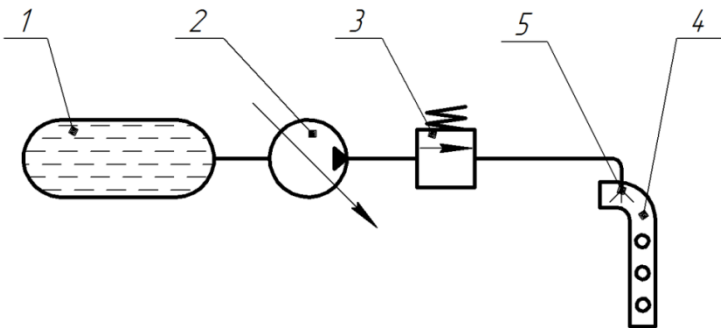


Рис. 3. Схема подачи смешивающего компонента

Схема установки по проведению замеров показана на рис. 4. Поток смешиваемого компонента с заданным давлением подавался в диффузор 1, на срезе которого устанавливался распылитель 2.

Прожектор 5, являющийся источником белого естественного света, монтируется за регистрирующим устройством. Фоном выступает экран 3 из металлического листа, зачерненного типографской краской. Для регистрации используется фотоаппарат 4, устанавливаемый перпендикулярно плоскости экрана на некотором расстоянии от распылителя.

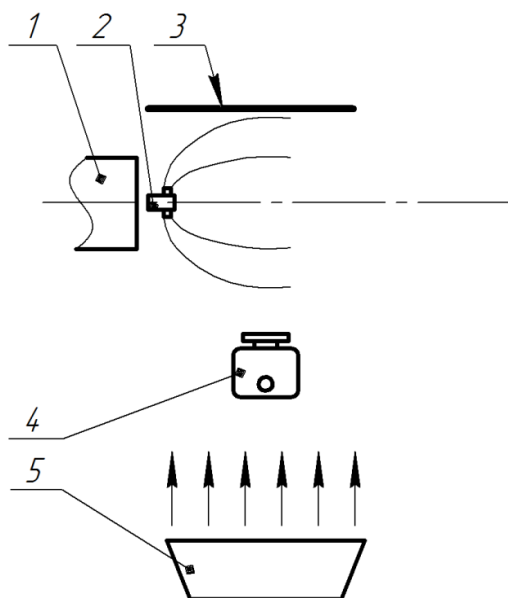


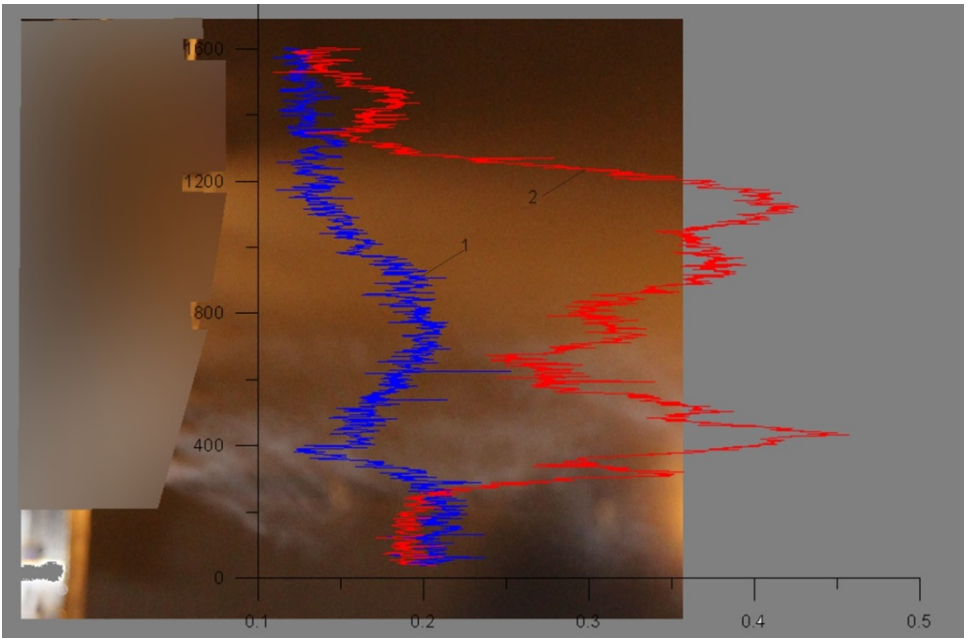
Рис. 4. Схема установки по проведению замеров

Перед началом эксперимента предварительно определяется фон, т. е. величина освещенности снимка, без подачи топлива в распылитель при данной системе освещения.

В ходе работ сравниваются два снимка, на одном из которых зафиксирована освещенность кадра при подаче топлива в распылитель, а на другом — фон. Для анализа выбирается та часть рабочего кадра, на границах которой освещенность не зависит от подачи топлива через распылитель. Эта часть снимка подвергается дальнейшему анализу.

Пример выбора рабочей части снимка можно проследить на рис. 5, на котором приведена освещенность снимка как при подаче топлива (кривая 2), так и без подачи топлива в эмульсионный распылитель (кривая 1).

**Математическая модель.** Для создания рабочего смесителя, обеспечивающего необходимые рабочие характеристики, нужна экспериментальная доводка изделия, что требует значительных материальных и временных затрат. Это повышает целесообразность аналитического исследования по данному направлению, так как результа-



**Рис. 5.** Изменение интенсивности освещенности снимка по высоте распылителя на рабочем режиме (линия 2) и уровня фона по высоте распылителя (линия 1)

том будет являться уменьшение себестоимости, времени на создание изделия, а также более четкое представление о рабочих процессах, происходящих при вихревом смешении.

Для описания процессов, происходящих в устройстве вихревого смешения, необходимо разработать математическую модель. Рабочие процессы, протекающие в расчетной области, описываются системой уравнений, для нестационарного турбулентного течения вязкой сжимаемой жидкости [10, 11]:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

где  $p$  — давление;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность;  $\vec{u}$  — вектор скорости;

- закон сохранения количества движения:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i, \quad (2)$$

где индекс  $i$  относится к входящему потоку; индекс  $j$  — к выходящему потоку;  $u_i$  — проекция вектора скорости  $\vec{u}$  на ось  $x_i$ ;  $S_i$  — источ-

ник объемных и поверхностных сил;  $\tau_{ij}$  — тензор напряжений для вязкой ньютоновской жидкости:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left( \xi - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (3)$$

где  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\delta_{ij}$  — оператор Кронекера.

— закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho H u_i - k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} - \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h, \quad (4)$$

где  $S_h$  — объемный источник тепла;  $H$  — полная удельная энтальпия жидкости,

$$H = h + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}, \quad (5)$$

где  $h = c_p T$  — удельная энтальпия, с допущением, что удельная теплоемкость жидкости постоянна  $u, v, w$  — проекции вектора скорости на направления  $x, y, z$  соответственно.

Система дополняется также уравнением состояния.

На входе в устройство заданы следующие граничные условия: давление  $P_{\text{вх1}}, P_{\text{вх2}}$ , температура  $T_{\text{вх1}}, T_{\text{вх2}}$ , скорость набегающего потока  $V_{\text{вх1}}$ , а также расход смешивающего вещества  $G_{\text{вх2}}$ . На выходе задаем значением давления  $P_{\text{вых}}$ .

Результатом решения системы уравнений является количество смеси, выходящей через каждое выходное отверстие устройства в единицу времени.

Вышеизложенная система уравнений описывают только течение однородной смеси. На начальном этапе, когда в основной компонент вводится смешивающий, смесь нельзя считать однородной. Процесс смешения происходит при взаимном влиянии обоих компонентов. Методика, описывающая этот процесс, для перемешивания веществ, находящихся в одной фазе, подробно изложена в [12], а для процесса перемешивания двухфазных потоков — в [13].

**Выводы.** Для исследования рабочих процессов в камере системы смешения в вихревом потоке была разработана схема экспериментального стенда и проведен эксперимент. В результате работы было выявлено, что ввиду сложного течения в системе получение требуе-

мого распределения поля концентрации веществ на выходе из устройства требует значительной экспериментальной доводки. Такой подход нецелесообразен с точки зрения экономичности и временных затрат.

Для решения данной проблемы требуется разработка математической модели для реализации численных методов решения. Использование этих методов позволяет более полно описать картину процессов, проходящих в исследуемом устройстве. Целью такого исследования является определение и оценка зависимостей геометрических характеристик смесителя от распределения концентрации компонентов и скоростей на каждом выходе из рабочего объема камеры смешения. Определив эти зависимости, можно сделать процесс смешения управляемым, что приведет к увеличению полноты смешения, возможности выдавать требуемое поле концентраций на выходе из смесителя.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хронин Д.В. *Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1989, 288 с.
- [2] Пчелкин Ю.М. *Камеры сгорания газотурбинных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1989, 266 с.
- [3] *Прямоточный вихревой смеситель*. Патент РФ № 2414283. Афанасенко В.Г. (RU), Боев Е.В. (RU), Иванов С.П. (RU), Афанасенко А.Г. (RU). МПК В01F5/00. Дата под. заявки 27.02.2009. Дата публ. патента 20.03.2011.
- [4] Христич В.А. *Экспериментальное исследование гидродинамики топливных коллекторов и структуры следа за стабилизаторным блоком: Отчет*. Москва, КПИ-ТМКБ «Союз», 1988.
- [5] Христич В.А. *Экспериментальное исследование распределения жидкого топлива по длине стабилизаторного блока: Отчет*. Москва, КПИ-ТМКБ «Союз», 1988.
- [6] Журавлев О.А., Ламаджанов Х.Д., Носырев Д.Я. Турбулентная структура двухфазной топливной струи. Определение фрактальной размерности факела распыла. *Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия*, Москва, 2003. Второй спец. выпуск.
- [7] *Экспериментальное определение характеристик пневматических форсунок и их сопоставление с результатами расчетов*. Москва, Авиационная и ракетно-космическая техника, 2002.
- [8] Определение характеристик распыливающих устройств камер сгорания с помощью оптических методов. *Двигатели XXI века. Международная научная конференция. Тезисы докладов. Ч. 2*. Москва, ЦИАМ, 2000.
- [9] Ван де Хюлст Г. *Рассеяние света малыми частицами*. Москва, Изд-во Иностранной Литературы, 1961, 445 с.
- [10] Дейч М.Е. *Техническая газодинамика*. Москва—Ленинград, Госэнергоиздат, 1961, 680 с.
- [11] Черный Г.Г. *Газовая динамика*. Москва, Наука, 1988, 424 с.
- [12] Щец Дж. Турбулентное течение. *Процессы вдува и перемешивания*. Москва, Мир, 1984, 164 с.

- [13] Абрамович Г.Н. *О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи*. Докл. АН СССР, 1970, т. 190, № 5, с. 1052–1054.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Писаревский А.Н., Кулаков Н.Н., Чернышев А.В., Белова О.В. Исследование рабочих процессов в устройствах смешения в вихревом потоке. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/761.html>

**Писаревский Андрей Николаевич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. по специальности «Вакуумная и компрессорная техника». Аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Кулаков Никита Николаевич** окончил факультет «Двигатели летательных аппаратов» МАИ им. С. Орджоникидзе в 2004 г. Аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Чернышев Андрей Владимирович** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и электропневматического оборудования различного назначения. e-mail: [av-chernyshev@yandex.ru](mailto:av-chernyshev@yandex.ru)

**Белова Ольга Владимировна** родилась в 1971 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области компьютерного моделирования инженерных систем.