

ТУРБУЛЕНТНОЕ СМЕШЕНИЕ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СТРУЙНОМ СМЕСИТЕЛЕ

АННОТАЦИЯ

Проведен анализ статистических характеристик турбулентности в поперечном сечении струйного смесителя на различном расстоянии от его сопла для двух режимов смешения: с образованием рециркуляционной зоны за соплом и без нее.

1. ВВЕДЕНИЕ

При изучении турбулентных течений жидкости или газа в прикладных задачах тепломассопереноса наряду с гидродинамикой потока рассматриваются особенности процессов переноса тепла и вещества. Турбулентное смешение обычно интерпретируется как процесс исчезновения во всем пространстве потока неоднородностей не только полей скорости и давления, а также скалярных полей – температуры, концентрации компонентов переносимой смеси, плотности и т.д. [1]. Вырождение неоднородностей скаляра, безусловно, определяется полем скорости. Вместе с тем поведение скалярного поля не следует непосредственно изменению динамических параметров, а проявляет определенную „независимость“, что является следствием пассивности скалярного поля в процессе переноса. Эта „независимость“ скаляра выявляет особенности динамического процесса, связанные с нестационарностью течения. Поэтому исследования процессов смешения дают информацию как непосредственно о развитии скалярного поля, так и открывают возможности более детального анализа развития поля скорости. Смешение скалярных полей в турбулентном потоке протекает под воздействием трех взаимосвязанных процессов [2, 3]:

- крупномасштабный перенос большими турбулентными вихрями (*макросмешение*);
- смешение за счет мелкомасштабного пульсационного движения среды до масштабов турбулентности, соизмеримых с колмогоровскими;
- смешение до молекулярных масштабов посредством молекулярной диффузии и переноса тепла за счет теплопроводности.

Два последних процесса определяются свойствами мелкомасштабных движений и характеризуют *микросмешение* скалярных полей.

Среди известных типов турбулентных сдвиговых течений тип течения в осесимметричных струйных смесителях привлекателен тем, что такие смесители являются достаточно простыми техническими устройствами, представляющими собой две соосно установленные трубы различного диаметра.

Несмотря на свою простоту, они позволяют реализовать как ламинарное, так и турбулентное смешение сред, а также комбинировать данные процессы путем выбора отношения расходов исходных сред. Вследствие этого они нашли широкое применение в химической и пищевой промышленности.

2. РЕЖИМЫ СМЕШЕНИЯ

В настоящей работе рассматривается смешение выдуваемой из сопла турбулентной струи и спутного потока, когда скорость струи превосходит скорость спутного потока. Возможные при этих условиях виды режимов смешения сводятся к двум принципиально разным случаям [4], которые определяются из отношения расходов $Q = Q_D/Q_d$ и диаметров смесителя D/d : *первый*, когда сразу же за соплом формируется рециркуляционная зона течения ($1 + Q < D/d$); *второй*, когда турбулентная струя ведет себя как выдуваемая из сопла свободная струя ($1 + Q > D/d$).

Число Рейнольдса, рассчитанное по параметрам сопла, было равно $Re_D = 10000$ для обоих режимов смешения. Параметры режимов смешения указаны в табл. 1.

Таблица 1. Параметры режимов смешения

№	Режим смешения	Q	D/d	Re_D/Re_d	f_V
1	с рециркуляционной зоной	1.3	5	0.27	0.43
2	без рециркуляционной зоны	5	5	1.042	0.17

Смеситель (рис. 1), представляющий собой трубу с внутренним диаметром $D = 50$ мм, соосно с которой устанавливалась трубка (сопло) с внутренним диаметром $d = 10$ мм, располагался в измерительном участке длиной $L = 1000$ мм водяного канала замкнутого типа.

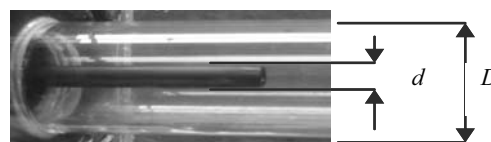


Рис. 1. Осесимметричный струйный смеситель

Через сопло впрыскивался водный раствор с 0.03 мг/л концентрацией родамина 6G. Измерения поля пассивной примеси осуществлялись с методом LIF. Более подробная информация об экспериментальной установке, измерительной аппаратуре и методике эксперимента приведена в [5].

Распределения пассивной примеси по сечению смесителя оценивались из распределений коэффициента смеси $f \in [0,1]$, определяемого по нормированной интенсивности излучения возбужденных лазером молекул родамина [5].

3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЭФФИЦИЕНТА СМЕСИ

Представление о влиянии возвратного течения (рис. 2а) на смешение дает осредненный по радиусу в каждом сечении смесителя коэффициент смеси

$$f_{mix} = \left(\int_0^{1/2} r^2 \langle f \rangle dr \right) / \left(\int_0^{1/2} r^2 dr \right).$$

Здесь r обезразмерено на D . Для рассмотренных режимов смешения динамика макросмешения вдоль оси смесителя отражается в различном изменении нормированного коэффициента смеси (рис. 2б)

$$Y = (f_{mix} - f_{in}) / (f_V - f_{in}).$$

На выходе из сопла величина $f_{mix} = f_{in}$ одинакова для обоих режимов, а f_V – значение f_{mix} в полностью перемешанном состоянии (табл. 1). На расстоянии $x/D < 0.6$ смешение практически подобно в обоих режимах (рис. 2б). Ниже по потоку макросмешение в режиме 1 близко к стадии завершения уже на расстоянии $x/D = 3.1$ (Y приближается к асимптотическому значению $Y = 1$), тогда как в режиме 2 такое состояние достигается только при $x/D = 9.1$.

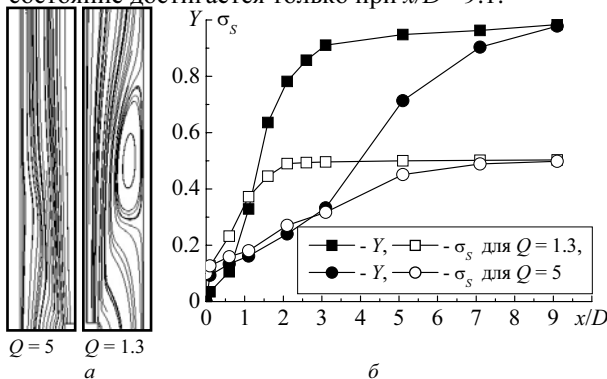


Рис. 2. Линии тока за соплом (а) и продольное изменение интегральных параметров Y и σ_S (б) для различных режимов смешения

Особенностью смешения в режиме 1 является рост значений $\langle f \rangle$ у стенок смесителя уже на расстоянии $x/D = 0.6$ (рис. 3а). Пассивная примесь переносится вдоль стенки возвратным течением, которое формируется около сечения $x/D = 3.0$. В режиме 2 аналогичный рост коэффициента смеси наблюдается только в сечении $x/D = 5.0$, когда на расширяющееся струйное течение начинают оказывать влияние стенки смесителя (рис. 3б). Отмеченная особенность развития поля скаляра в режиме 1 обеспечивает формирование однородного состояния почти на 4 калибра раньше, чем в режиме 2.

Для режима 2 до расстояний $x/D \leq 3.1$ изменение профиля $\langle f \rangle$ достаточно хорошо описывается соотношением $\langle f \rangle / f_0 = \exp(-2r^2 / \sigma_S^2)$ (линии на рис. 3). Эта аппроксимация справедлива для случая смешения турбулентной струи со спутным потоком

в неограниченной области. Здесь величина $\sigma_S = \sqrt{3 \int_0^{1/2} r^2 \langle f \rangle dr / \int_0^{1/2} \langle f \rangle dr}$ (r и σ_S обезразмерены на D) ответственна за поперечный размер струи и указывает на вероятное положение слоя смешения, образующегося на границе взаимодействия струи и спутного потока. Для $x/D > 3.1$ в результате взаимодействия струи (рис. 2б) со стенками смесителя профиль коэффициента смеси расширяется быстрее, чем это следует из экспоненциальной зависимости (рис. 3б).

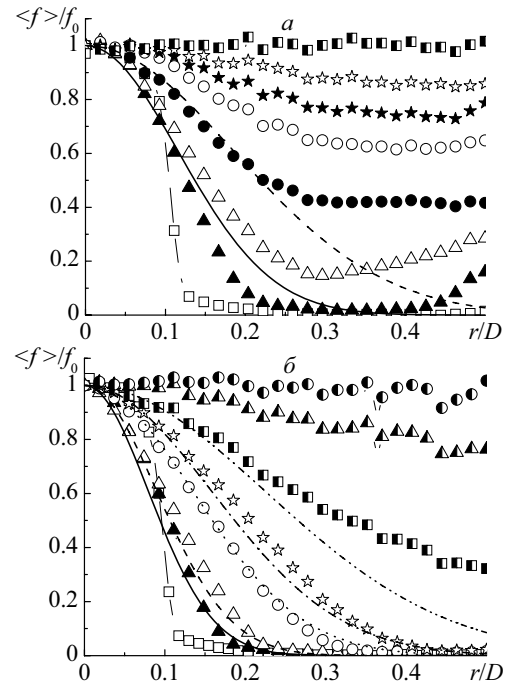


Рис. 3. Средние значения коэффициента смеси для двух режимов (а – $Q = 1.3$, б – $Q = 5$) на различном расстоянии от сопла: –□– $x/D = 0.1$, –▲– и –△– и –●– 1.1, –○– и –☆– 1.6, –○– и –☆– 2.1, –★– 2.6, –☆– и –○– 3.1, –■– и –○– 5.1, –▲– 7.1, –●– 9.1

Для режима 1 профиль $\langle f \rangle$ отклоняется от экспоненциального распределения при приближении к стенкам смесителя уже в сечении $x/D = 0.6$. Это указывает на влияние возвратного течения у стенок смесителя на развитие струи, что обуславливает быстрое увеличение интегрального параметра σ_S и достижение им асимптотического значения 0.5 для $x/D \leq 2.1$ (рис. 2б). Данный факт отражает наличие значительного содержания примеси по всему сечению смесителя. Координаты границ взаимодействия спутного потока с возвратным течением могут быть установлены из анализа профилей среднеквадратичных скалярных пульсаций: их значения возрастают при взаимодействии возвратного течения со спутным потоком (рис. 4а). Высокий уровень скалярных пульсаций в пристеночной области ($r/D > 0.4$, $x/D = 0.6$) сохраняется вниз по потоку до $x/D \leq 1.6$, расширяясь в направлении оси смесителя, а затем начинает снижаться. Изменение профилей, приведенных на рис. 3, 4, показывает, что рециркуляционная зона начинается с расстояния $x/D > 0.6$, ее центр располагается между сечениями $2.1 < x/D < 2.6$ и граница ее вырождения лежит за сечением

$x/D = 3.1$, поскольку пульсации должны уменьшаться при приближении к центру рециркуляционной зоны, а в сечении, проходящем через центр этой зоны, должно наблюдаться близкое к однородному распределение примеси.

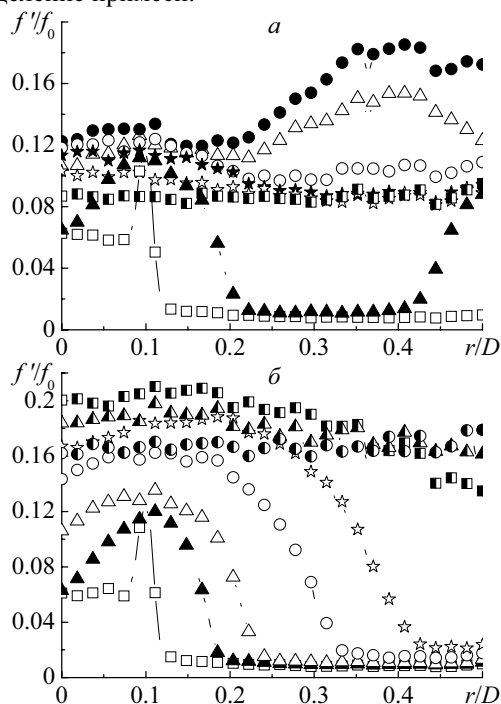


Рис. 4. Среднеквадратичные пульсации коэффициента смеси для двух режимов (а – $Q = 1.3$, б – $Q = 5$) на различном расстоянии от сопла (обозначения рис. 3)

В режиме 2 по мере расширения струи ($0.1 < x/D < 5.1$) профиль среднеквадратичных скалярных пульсаций также расширяется. Из-за высокого уровня перемежаемости на границе взаимодействия струи и спутного потока максимальный уровень пульсаций фиксируется на расстоянии приблизительно $r = \sigma_y$ от оси смесителя. При $x/D > 7.1$ происходит выравнивание пульсаций по всему сечению смесителя с постепенным уменьшением их уровня, но они почти в два раза выше аналогичных значений в режиме 1.

Первая стадия формирования однородного состояния смеси, когда достигается макросмешение, т.е. выравнивание значений скаляра по сечению, завершается только в режиме смешения с рециркуляционной зоной. Однако полное смешение смеси характеризуется завершением также процесса микросмешения, когда происходит вырождение пульсаций скаляра в поперечном сечении смесителя [1]. Поскольку зафиксировать нулевой уровень пульсаций в экспериментальных исследованиях весьма проблематично, то о состоянии процесса микросмешения можно судить по виду одноточечной ФПРВ коэффициента смеси. Эта функция является хорошим критерием тонкоструктурного смешения, связанного со взаимодействием в потоке мелко-масштабных турбулентных движений и молекулярной диффузии [2, 3].

ФПРВ на оси смесителя для обоих режимов (рис. 5) имеет пологий одномодовый профиль, который вниз по потоку сужается, а ФПРВ локализуется при значении коэффициента смеси, равного f_1 .

Вид ФПРВ, существенно отличающийся от δ -функции на расстоянии $x/D = 7.1$, а также относительно высокий уровень скалярных пульсаций (рис. 4) свидетельствуют о незавершенности процесса микросмешения. Рис. 5 также демонстрирует возможность использования β -распределения [6] в качестве теоретической модели, описывающей экспериментальные ФПРВ в приосевой области.

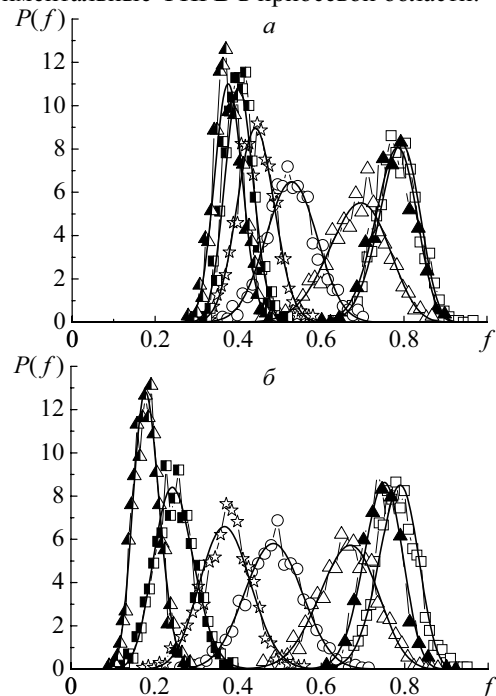


Рис. 5. ФПРВ коэффициента смеси для двух режимов (а – $Q = 1.3$, б – $Q = 5$) на различном расстоянии от сопла при $r/D = 0$ (обозначения рис. 3); линии — расчет согласно β -распределению

Для режима 2 применение β -распределения в качестве модели для ФПРВ вполне приемлемо для описания статистических моментов более высокого порядка – асимметрии и эксцесса, ответственных за явление перемежаемости в потоке (рис. 6а – в). Некоторые проблемы согласования распределений асимметрии и эксцесса сохраняются в узкой зоне на границе струи, где для расчета ФПРВ недостаточно двух первых статистических моментов [7].

Для режима 1 показано [7], что в областях большой перемежаемости существуют не только большие расхождения в значениях асимметрии и эксцесса, рассчитанных на основе ФПРВ в виде β -распределения, и аналогичных величин, полученных из эксперимента (рис. 6г – е), но также наблюдается их качественно другое поведение (рис. 6е).

Соотношение $Ku = 3 + Sk^2$, построенное на основе обобщения гипотезы Миллионщикова [8], справедливо для аппроксимации экспериментальных распределений эксцесса для режима 2 во всей области потока (рис. 6а – в). Для режима 1 существует некоторое отклонение расчетных значений от экспериментальных в области рециркуляции (рис. 6г, д) с сохранением качественного поведения распределений эксцесса. Несмотря на такой факт, можно рекомендовать предложенную аппроксимацию для замыкания моделей турбулентного смешения в струйных смесителях.

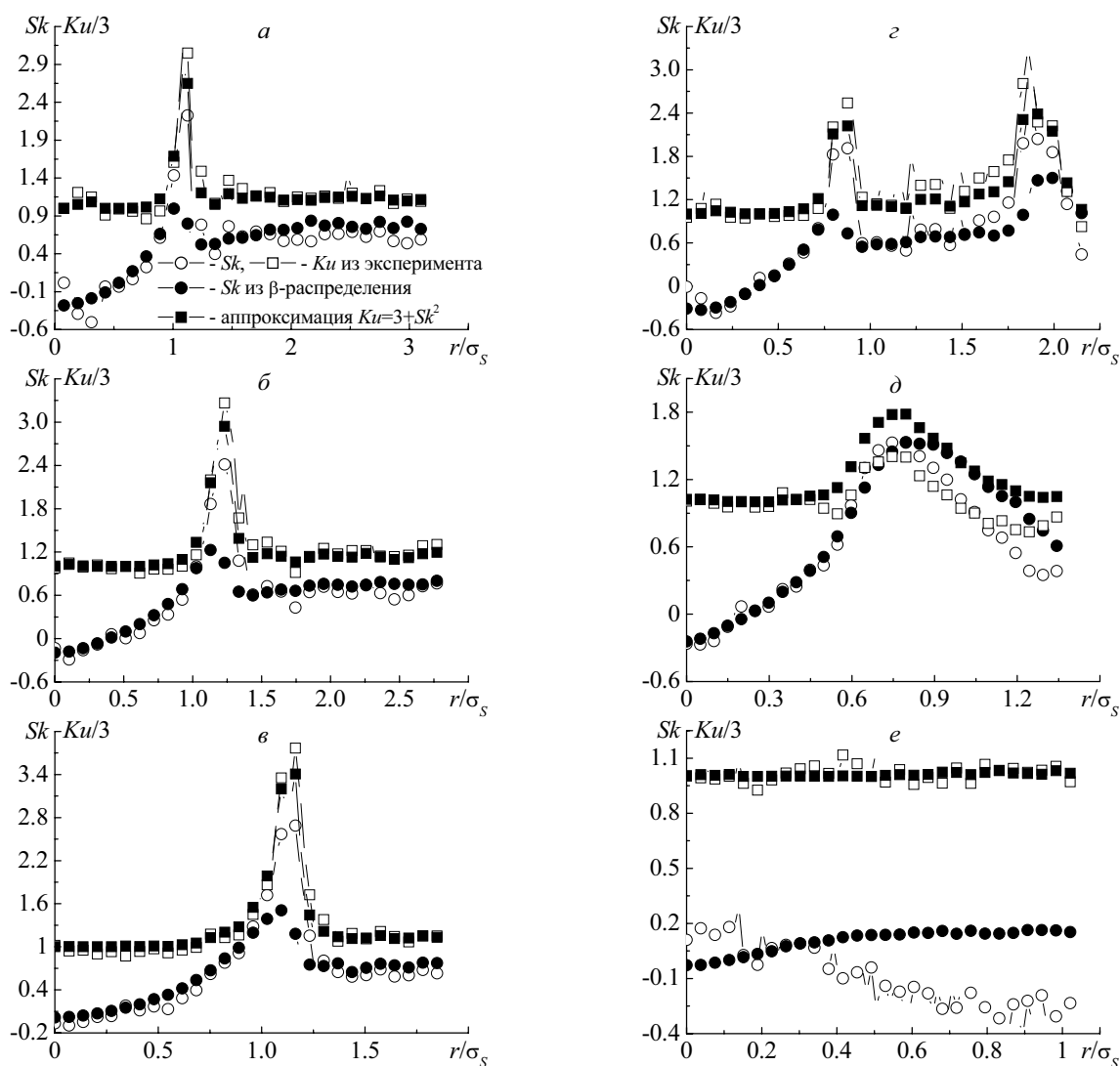


Рис. 6. Коэффициенты асимметрии и эксцесса для режимов смешения (а, б, в – $Q = 5$, г, д, е – $Q = 1.3$) на различном расстоянии от сопла: а), г) $x/D = 0.6$; б), д) 1.1; в), е) 2.1.

Работа выполнена при поддержке Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований (Т06МС – 042), а также Немецкого фонда фундаментальных исследований (DFG).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ФПРВ – функция плотности распределения вероятности;
 D и d – диаметры смесителя и сопла;
 f – коэффициент смеси;
 f_0 – среднее значение коэффициента смеси на оси;
 $\langle f \rangle$ – среднее значение коэффициента смеси;
 f' – среднеквадратичная пульсация;
 $f_l = 1/(Q+1)$ – среднее значение объемной концентрации;
 Ku – коэффициент эксцесса;
 L – длина смесителя;
 $P(f)$ – ФПРВ коэффициента смеси;
 Q – отношение расходов;
 Q_D – расход смеси на входе спутного потока;
 Q_d – расход смеси на выходе из сопла;
 r – координатная ось поперек смесителя;
 Re_D и Re_d – числа Рейнольдса, рассчитанные по параметрам спутного потока и сопла соответственно;
 Sk – коэффициент асимметрии;
 x – координатная ось вдоль смесителя.
 Индексы:
 0 – на оси смесителя;
 in – в первом сечении смесителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brodkey R.S.** Mixing in turbulent fields // Turbulence in Mixing Operations / Ed. R.S. Brodkey. London and N.Y.: Academic Press, 1975. P. 45 – 119.
2. **Ионаш П., Коловандин Б.А., Сидорович Т.В., Соснович В.А., Пржигода Я.** О теоретическом описании смешения реагентов в турбулентном потоке // Стройнишки часопис. 1984. Т. 35. № 6. С. 739 – 749.
3. **Fox R.O.** Computational models for turbulent reacting flows. Cambridge University Press, 2003. 419 p.
4. **Henzler H.J.** Investigations on mixing fluids. Doctor's Dissertation. Aachen: RWTH, 1978.
5. **Zhdanov V.L., Kornev N.V. and Hassel E.** LIF investigation of the concentration field in the co-axial mixer // Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. 12 Fachtagung. 7 – 9 September, 2004. Universität Karlsruhe. Karlsruhe, 2004. P. 16-1 – 16-8.
6. **Rhodes R.P.** A probability distribution function for turbulent flows // Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows / Ed. S.N.B. Murthy. N.Y.: Plenum Press, 1975. P. 235 – 241.
7. **Жданов В. Л., Чорный А.Д., Хассель Э.** Анализ процесса смешения пассивной примеси в струйном смесителе // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 6.
8. **Gryanik V.M., Hartmann J.** A turbulence closure for the convective boundary layer based on a two-scale mass-flux approach // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. P. 2729 – 2744.