

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕШЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ГАЗОВ В ТРОЙНИКОВОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ДИАМЕТРА БОКОВОЙ ТРУБЫ И УГЛА ЕЕ ВРЕЗКИ

Ф.В. Тупоносов

В.И. Артемов

Г.Г. Яньков

А.В. Дедов

tuponosov@gmail.com

viartemov@yandex.ru

yankovgg@mail.ru

dedovav@mpei.ru

НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведено численное исследование процессов смешения многокомпонентных газовых потоков в тройниковом соединении с различным диаметром боковой трубы и углом ее врезки 90° . В основную трубу диаметром $D_1 = 254$ мм подавался метан с массовым расходом 10 кг/с и температурой 60 °С, в боковую — смесь трех газов (метана, водорода, азота) с мольными долями $r_{\text{CH}_4} = r_{\text{H}_2} = 0,4$, $r_{\text{N}_2} = 0,2$, расходом смеси 10 кг/с и температурой 90 °С. Диаметр боковой трубы варьировался в диапазоне значений $D_2 = (0,6 \dots 1,0)D_1$. Для различных значений D_2/D_1 получены поля скорости, температуры и массовых долей компонентов смеси в основной трубе. Определено оптимальное значение D_2/D_1 , обеспечивающее необходимую однородность состава и температуры смеси в основной трубе на расстоянии $20D_1$ от начала смешения. Моделирование также выполнено для тройникового соединения с трубами одного диаметра D_1 и углом врезки боковой трубы 60° . Показано, что такой угол врезки существенно улучшает качество смешения смеси в тройниковом соединении. Для Т-образного тройника с $D_2/D_1 = 1$ определены длины дополнительных фрагментов основной трубы (технически гладкой и с шероховатостью Ra40), обеспечивающих необходимую однородность состава и температуры газовой смеси

Ключевые слова

Тройниковое соединение, смешение, газовый компонент, диаметр боковой трубы, угол врезки, турбулентная диффузия, вырождение неоднородностей

Поступила 13.06.2023

Принята 31.07.2023

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0017 (соглашение № 075-032023-383 от 18.01.2023) в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг.

Введение. Проблеме смешения жидкостей и газов в тройниковых соединениях труб посвящено значительное число экспериментальных и расчетно-теоретических работ. Некоторые результаты выполненных к настоящему времени исследований и практические рекомендации приведены, например, в [1–5]. С одной стороны, множество выполненных работ объясняется чрезвычайной актуальностью эффективного и безопасного (с позиции прочности тройникового соединения) смешения различных сред для многих отраслей промышленности, сельского и коммунального хозяйства, с другой — особенностями процессов смешения в каждом конкретном случае, такими как опасные динамические нагрузки на стенки тройника; циклические термонапряжения; контакт стенок с агрессивными средами; недопустимые неоднородности состава или температуры среды в выходном сечении тройника и др.

В настоящей работе численно исследовано смешение в тройниковом соединении природного газа с так называемыми отдувками нефтехимических производств, представляющими собой смесь водорода и метана с азотом, для использования полученной смеси в качестве топлива. Особенность процесса смешения — высокие числа Рейнольдса ($\sim 5 \cdot 10^6$) потоков газов в основной и боковой трубах исходного тройникового соединения с одинаковыми диаметрами труб. После смешения потоков числа Рейнольдса в основной трубе превышают значение 10^7 . Именно это не позволяет использовать для анализа эффективности смешения и оптимизации конструкции тройникового соединения современные вихреразрешающие методы LES (Large Eddy Simulation), DES (Detached Eddy Simulation) ввиду чрезвычайно емких компьютерных ресурсов, необходимых для их реализации. В настоящее время пределы использования указанных методов по числам Рейнольдса (на входах в основную и боковую трубы тройникового смесителя) не превышают $2 \cdot 10^5$ (см., например, [4, 6, 7]). Это учтено и в [8], где приведен краткий обзор работ, представляющих интерес применительно к рассматриваемому случаю. В этой работе также подробно рассмотрены модификация и результаты валидации стандартной модели k - ε , учитывающей зависимость «константы» модели C_μ и турбулентного числа Шмидта от осредненного по сечению отношения скорости порождения кинетической энергии турбулентных пульсаций к скорости диссипации этой энергии. Показано [8], что при одинаковых диаметрах труб тройникового соединения D и угле врезки боковой трубы 90° неоднородность состава смеси оказывается недопустимо высокой даже в сечении основной трубы, отстоящем от начала смешения на расстоянии $20D$.

Цель работы — привести результаты численного исследования эффективности смешения в тройниковом соединении топливных составляющих при изменении диаметра боковой трубы (импульса боковой струи газа) и угла ее врезки, а также последующего вырождения неоднородностей состава смеси в прямолинейном участке трубопровода за тройниковым соединением.

Постановка задачи моделирования. Рассмотрено тройниковое соединение труб, на входы в которые подаются метан с массовым расходом $Q_1 = 10$ кг/с и температурой $T_1 = 60$ °С (основная труба) и смесь трех газов (метана CH_4 , водорода H_2 и азота N_2) с мольными долями $r_{\text{CH}_4} = r_{\text{H}_2} = 0,4$, $r_{\text{N}_2} = 0,2$, расходом смеси $Q_2 = 10$ кг/с и температурой $T_2 = 90$ °С (боковая труба). Диаметр основной трубы $D_1 = 254$ мм, диаметр боковой трубы в исходной конструкции тройникового соединения $D_2 = 254$ мм. В качестве критерия неоднородности состава смеси в некотором сечении основной трубы за тройниковым соединением использован параметр $H_l = ((c_{l, \max} - c_{l, \min}) / c_{l, \text{mid}}) \cdot 100\%$, где $c_{l, \max}$, $c_{l, \min}$ — максимальное и минимальное значения в сечении массовой доли компонента l смеси ($l = \text{H}_2, \text{N}_2, \text{CH}_4$); $c_{l, \text{mid}} = \frac{\int_A \rho c_l u_z dS}{\int_A \rho u_z dS}$ — среднемассовое значение массовой доли l -го компонента, A — площадь сечения трубы, м^2 , ρ — плотность смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$, u_z — аксиальная компонента скорости смеси в основной трубе, $\text{м}/\text{с}$. Значения H_l , полученные в [8] на расстоянии $z = 20D_1$ от начала смешения для варианта $D_2 / D_1 = 1$ и угла врезки боковой трубы 90° (Т-образное соединение труб), приведены ниже:

Параметр:	CH_4	H_2	N_2
$c_{l, \text{mid}}$	0,750	0,0315	0,218
$c_{l, \max} - c_{l, \min}$	0,077	0,0097	0,067
H_l	10	31	31

Отметим, что параметры неоднородности водорода и азота совпадают, что неверно для массовых и мольных долей.

Для достижения требуемой однородности состава смеси $H_l \leq 1\%$ за тройниковым соединением необходим статический смеситель или относительно протяженный участок основной трубы, в котором неоднородности состава вырождаются вследствие турбулентной диффузии.

Поля температуры и мольной доли водорода в сечении симметрии для исходного варианта Т-образного соединения с $D_2 / D_1 = 1$, полученные в [8],

представлены на рис. 1. Результаты анализа этих полей показывают, что в соответствии с выводами, приведенными в [9], режим смешения не является оптимальным, так как «ось» боковой струи газа после разворота не совпадает с осью основной трубы. Действительно, ввиду недостаточного импульса боковая струя газа оказывается «прижатой» к верхней образующей основной трубы. Следует отметить, что вопрос оптимальной подачи бокового потока в Т-образное соединение изучен во многих работах как экспериментально [10–14], так и с использованием некоторых упрощенных моделей турбулентной струи в круглой трубе [15]. Полученные данные при смешении потоков воды в [10, 11] описаны эмпирической формулой для параметра $R_U = U_2 / U_1$, обеспечивающего оптимальное смешение (U_2, U_1 — среднemasовые скорости потоков в боковой и основной трубах). Аналогичная по смыслу эмпирическая формула получена в [12] для смешения воздушных потоков. Обобщающие зависимости для определения оптимальных объемных расходов смешиваемых газов при заданных диаметрах труб Т-образного соединения предложены в [13, 15]. Однако имеющиеся формулы не обладают достаточной универсальностью для того, чтобы использовать их в целях настоящей работы. Некоторая условная классификация режимов, отличающихся глубиной проникания боковой струи в основной поток, предложена в [16].

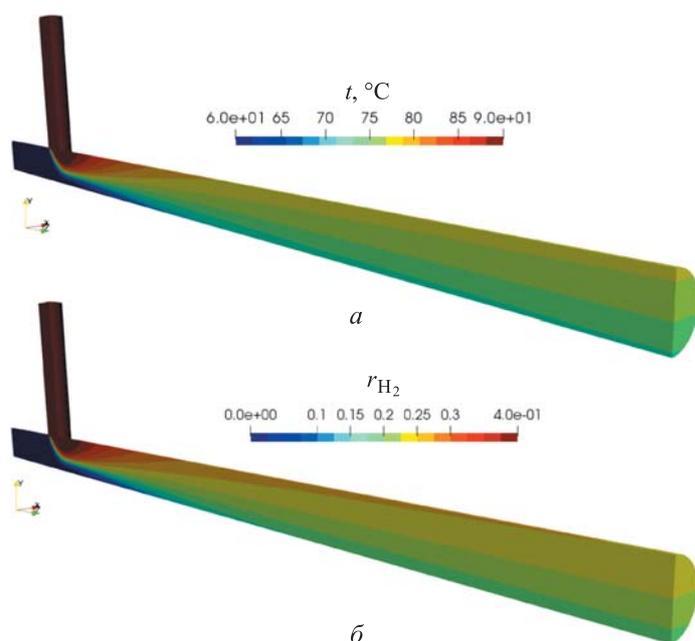


Рис. 1. Поля температуры (а) и мольной доли водорода (б) в вертикальном сечении тройникового соединения при $D_2 / D_1 = 1$

Для анализа влияния геометрических характеристик тройникового соединения на эффективность смешения газовых компонентов выполнены расчеты с уменьшенным диаметром боковой трубы ($D_2 < D_1$) и углом ее врезки 60° (угол отсчитывается от положительного направления оси z против хода часовой стрелки).

В математическом плане задача полностью идентична сформулированной в [8]. Система определяющих уравнений включает в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения сохранения массы, импульса и энергии для смеси газов, уравнения сохранения массы для каждого компонента смеси. Для расчета турбулентной вязкости использована двухпараметрическая модель k - ε для высоких турбулентных чисел Рейнольдса с пристеночными функциями Лаундера — Сполдинга [17] и Кадера [18], модифицированная авторами работы [8]. Свойства смеси газов рассчитываются с привлечением модели идеального газа и соотношений Уилки, Масона и Саксены [19, 20]. Все свойства чистых компонентов полагаются постоянными. При расчете эффективных коэффициентов диффузии молекулярные числа Шмидта (Sc) полагаются равными единице для всех компонентов. Зависимости «константы» C_μ и турбулентных чисел Прандтля и Шмидта от осредненного по сечению отношения скорости порождения кинетической энергии турбулентных пульсаций к скорости диссипации этой энергии приведены в [8]. В этой работе отмечено, что влиянием сил плавучести для рассматриваемого режима можно пренебречь ввиду высоких чисел Рейнольдса смешиваемых потоков.

Расчеты выполнены с использованием CF-кода ANES¹ на неструктурированных декартовых сетках. Начало координат соответствует точке пересечения осей труб тройника, ось z совпадает с осью основной трубы и направлена по течению газа, направления осей x и y показаны на рис. 1. Общее число ячеек численной сетки для 1/2 конструкции тройникового соединения (с учетом симметрии) варьировалось в зависимости от рассчитываемого варианта в диапазоне 1,4...1,8 млн шт. Сеточная независимость результатов от числа ячеек сетки исследована в [8].

Результаты моделирования процессов смешения газов в различных тройниковых соединениях труб. Влияние отношения D_2 / D_1 на качество смешения. Для изучения влияния изменения диаметра боковой трубы на эффективность смешения проведены расчеты тройникового соединения при различных значениях D_2 / D_1 ($D_1 = 254$ мм). Массовые

¹ CF-код ANES. URL: <http://anes.ch12655.tmweb.ru> (дата обращения: 15.12.2023).

расходы через трубы одинаковы (10 кг/с). Результаты расчетов показывают, что уменьшение диаметра боковой трубы приводит к улучшению смешения компонентов за счет «правильной» траектории боковой струи. При этом перепад давления в основной трубе незначительно увеличивается (с 9 кПа при $D_2/D_1 = 1$ до 9,64 кПа при $D_2/D_1 = 0,6$). Значения параметра неоднородности H_l на выходе из основной трубы при $z/D_1 = 20$ для шести вариантов отношения диаметров труб приведены ниже:

D_2/D_1	1,0	0,8	0,70	0,65	0,63	0,60
H_{CH_4}	10,0	4,9	1,8	0,40	0,14	0,78
H_{H_2}/H_{N_2}	31,0	14,8	5,4	1,19	0,43	2,3

Поля температуры и мольной доли водорода в вертикальном сечении смесителя при $D_2/D_1 = 1,0; 0,70; 0,63; 0,60$ представлены на рис. 2. Заметно формирование разных «траекторий» боковой струи в зоне ее разворота

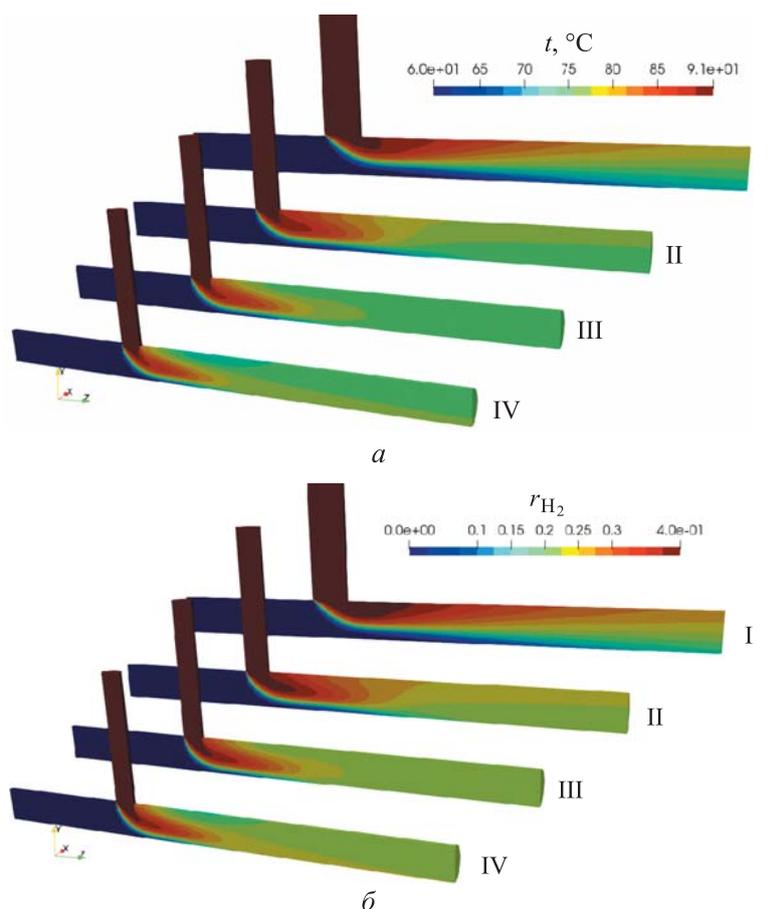


Рис. 2. Поля температуры (а) и мольной доли водорода (б) в вертикальном сечении Т-образного соединения при $D_2/D_1 = 1,0$ (I), 0,70 (II), 0,63 (III), 0,60 (IV)

та и оттеснение ее в сторону противоположной образующей основной трубы при уменьшении D_2/D_1 , что приводит к существенному изменению параметров неоднородности. Профили мольных долей метана, водорода и температуры вдоль вертикального диаметра основной трубы при $z/D_1 = 20$ и $D_2/D_1 = 1,0; 0,70; 0,63; 0,60$ показаны на рис. 3. Наилучшие результаты получены при $D_2/D_1 = 0,63$.

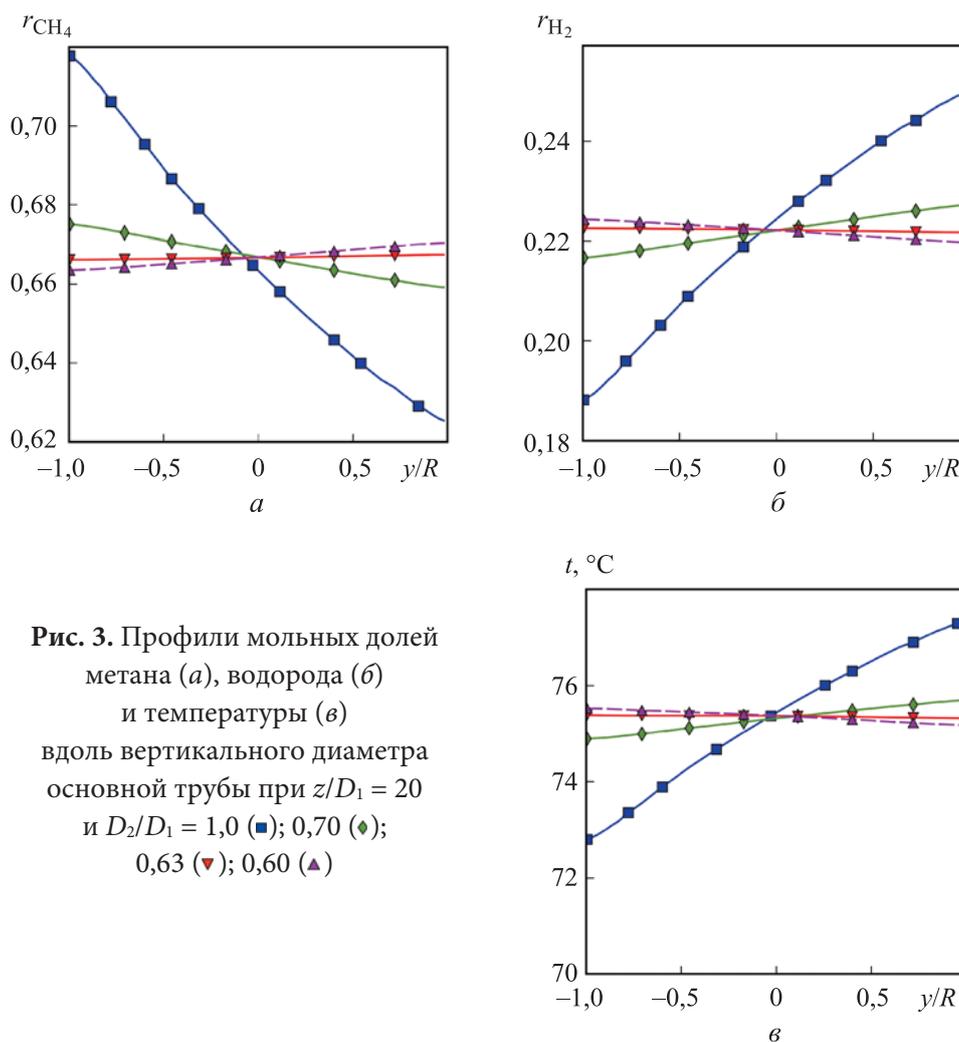


Рис. 3. Профили мольных долей метана (а), водорода (б) и температуры (в) вдоль вертикального диаметра основной трубы при $z/D_1 = 20$ и $D_2/D_1 = 1,0$ (■); 0,70 (◆); 0,63 (▼); 0,60 (▲)

Влияние угла врезки боковой трубы на качество смешения. Показано в [21], что при углах врезки боковой трубы менее 90° качество смешения улучшается. Для исследования влияния угла врезки боковой трубы смоделировано соединение с трубами одинакового диаметра и углом врезки $\theta = 60^\circ$ (угол отсчитывается от положительного направления оси z против хода часовой стрелки). Сетка ячеек для угла врезки 60° представлена

на рис. 4. Отличие от рассмотренного выше случая заключается в том, что боковая труба изогнута в виде «колена» для удобства задания граничных условий для искомых переменных на ее входе, находящемся в плоскости xu . В этом случае на входе в боковую трубу вектор плотности массового потока ρu будет иметь только одну, отличную от нуля компоненту z .

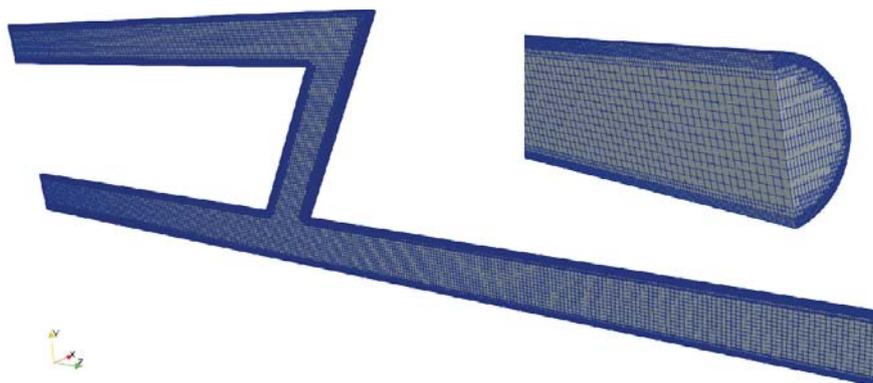


Рис. 4. Смеситель с углом врезки боковой трубы 60°

Линии тока газа и поля мольных долей метана и водорода в сечении симметрии тройникового соединения показаны на рис. 5.

Более детальную информацию дают распределения параметров неоднородности по длине трубы (рис. 6) и профили массовых долей метана, азота и водорода в сечениях, отстоящих на $2, 5, 8$ и $20D_1$ от начала смешения (рис. 7). Хорошо заметно более эффективное смешение компонентов газа при угле врезки боковой трубы 60° .

Моделирование турбулентного смешения газов в прямолинейном фрагменте трубопровода. Если по технико-эксплуатационным требованиям использование тройникового соединения с $D_2/D_1 \neq 1$, $\theta \neq 90^\circ$ является невозможным, то для вырождения неоднородностей состава газовой смеси до требуемого уровня необходимо использовать статические смесители или участки прямолинейных трубопроводов, расположенных за тройниковым соединением ниже по течению газовой смеси. Здесь проанализировано вырождение неоднородностей в прямых трубах — технически гладкой и со средней шероховатостью внутренней поверхности $Ra40$ мкм (стандартная техническая шероховатость для бесшовных труб). На входе во фрагмент прямой трубы задавали поля искомых переменных, полученные в [8] при $z/D_1 = 20$ от начала смешения в тройниковом соединении с $D_2/D_1 = 1$, $\theta = 90^\circ$ (рис. 8).

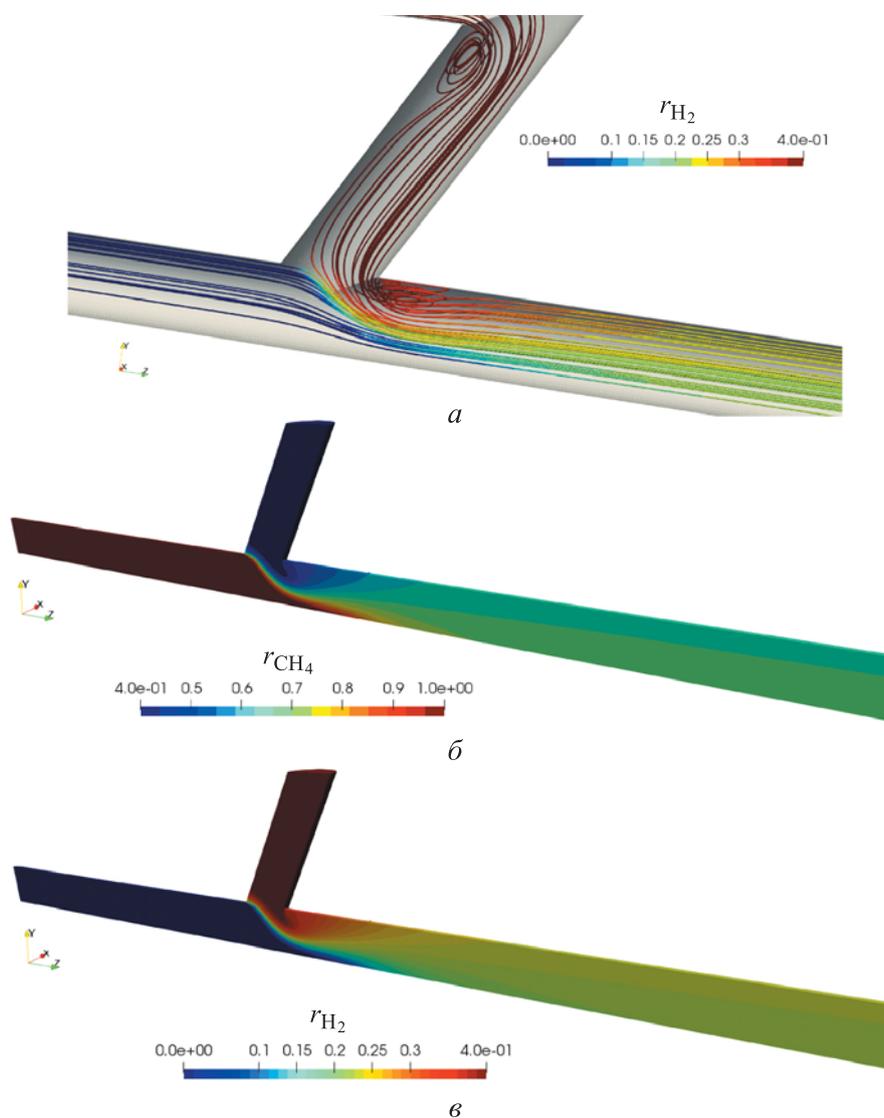


Рис. 5. Линии тока газа (*a*) в вертикальной плоскости симметрии соединения с углом врезки 60° (цвет линий соответствует мольной доле водорода), поля мольных долей метана (*б*) и водорода (*в*) в вертикальной плоскости симметрии соединения при угле врезки 60°

Для учета шероховатости в модели k - ϵ с пристеночными функциями использован закон для скорости, предложенный Сполдингом и Джаятил-лака [22]:

$$\frac{u_1}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey_1^+), \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad y_1^+ = \frac{u_\tau y_1}{\nu},$$

$$E = \begin{cases} E_0, & h_r^+ < 3,7, \\ \frac{1}{\sqrt{a \left(\frac{h_r^+}{b}\right)^2 + (1-a) \left(\frac{1}{E_0^2}\right)}}, & 3,7 < h_r^+ < 100, \\ \frac{b}{h_r^+}, & h_r^+ > 100, \end{cases}$$

$$b = 29,7, \quad a = (1 + 2x^3 - 3x^2); \quad x = 0,02248 \frac{100 - h_r^+}{(h_r^+)^{0,564}}.$$

Здесь u_1 — касательная к стенке скорость в центре пристеночной ячейки сетки, м/с; u_τ — динамическая скорость, м/с; $\kappa = 0,41$ — постоянная Кармана; τ_w — касательное напряжение на стенке, н/м²; ρ — плотность газовой смеси; $E_0 = 8,6$ — постоянная логарифмического профиля для гладкой стенки; $h_r^+ = u_\tau h_r / \nu$ — безразмерная высота шероховатости, h_r — средняя высота шероховатости, м.

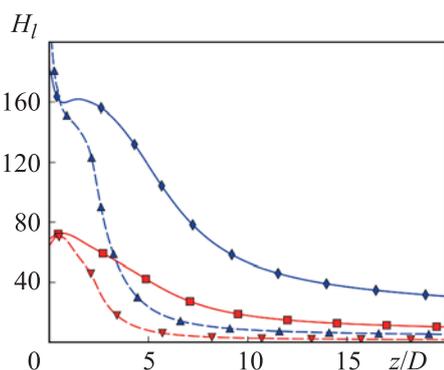


Рис. 6. Распределение параметров неоднородности по длине трубы ($z = 0$ соответствует началу смешения) при угле врезки 90° H_{CH_4} (■), H_{H_2} / H_{N_2} (◆) и при угле врезки 60° H_{CH_4} (▼), H_{H_2} / H_{N_2} (▲)

Распределения параметров неоднородностей H_l и $H_t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\Delta t}$

($\Delta t = 30$ °С — исходная разность температур смешиваемых газовых потоков) по длине трубы показаны на рис. 9. Для достижения требуемой однородности состава и температуры смеси ($H_l, H_t < 1\%$) с заданными неоднородностями этих параметров на входе необходим дополнительный участок гладкой трубы длиной примерно $180D_1$ (45,7 м) или трубы с шероховатостью Ra40 длиной $150D_1$ (38 м). Указанные длины основной трубы, определенные от начала смешения, необходимо увеличить на $20D_1$, поскольку $z = 0$ на рис. 9 соответствует входному сечению боковой трубы.

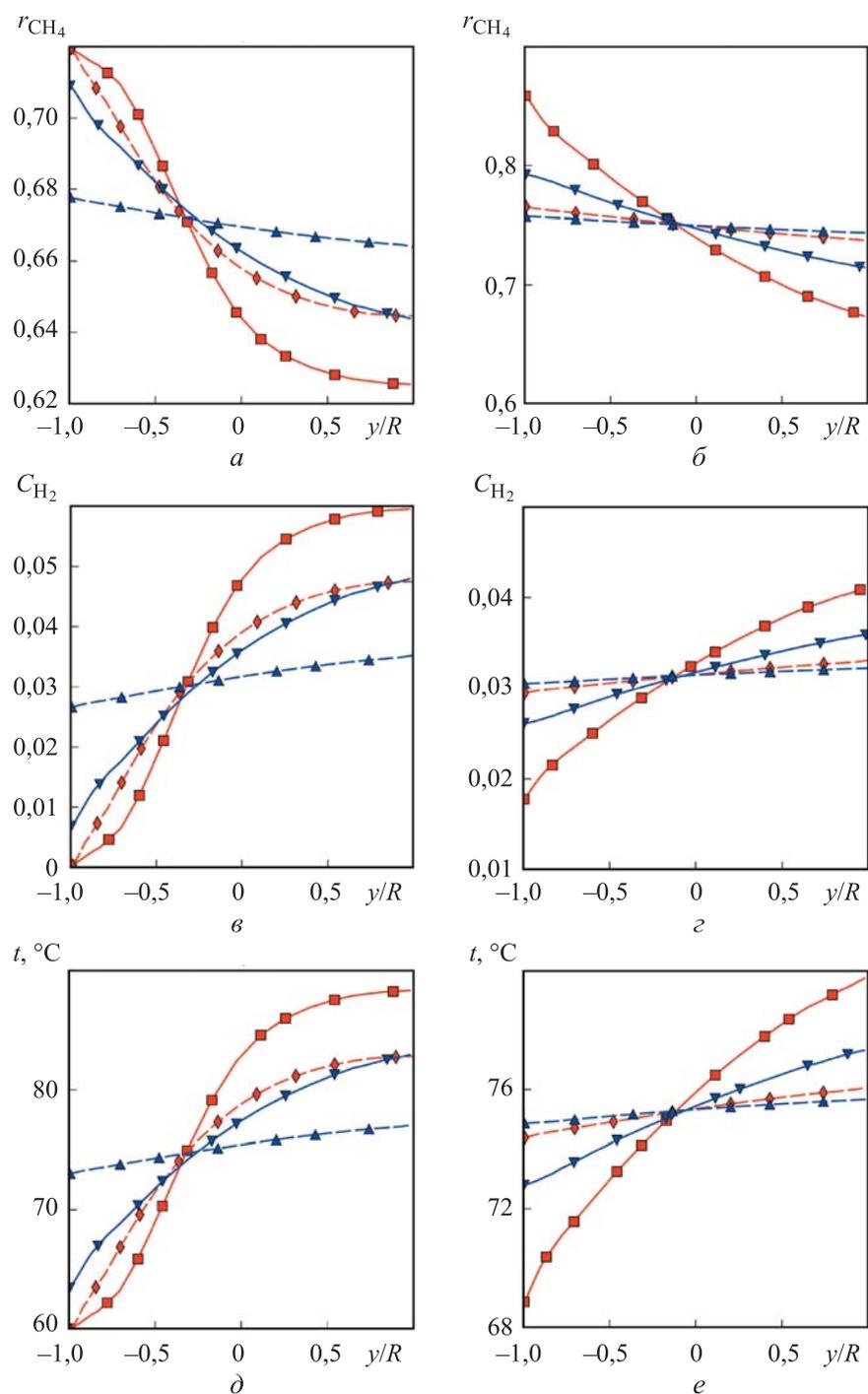


Рис. 7. Распределения массовых долей метана (*a*, *б*), водорода (*в*, *г*) и температуры (*д*, *е*) в различных сечениях:

a, *в*, *д* — $z/D_1 = 2$ ($\theta = 90^\circ$ (■), $\theta = 60^\circ$ (◆)), $z/D_1 = 5$ ($\theta = 90^\circ$ (▼), $\theta = 60^\circ$ (▲));
б, *г*, *е* — $z/D_1 = 8$ ($\theta = 90^\circ$ (■), $\theta = 60^\circ$ (◆)), $z/D_1 = 20$ ($\theta = 90^\circ$ (▼), $\theta = 60^\circ$ (▲))

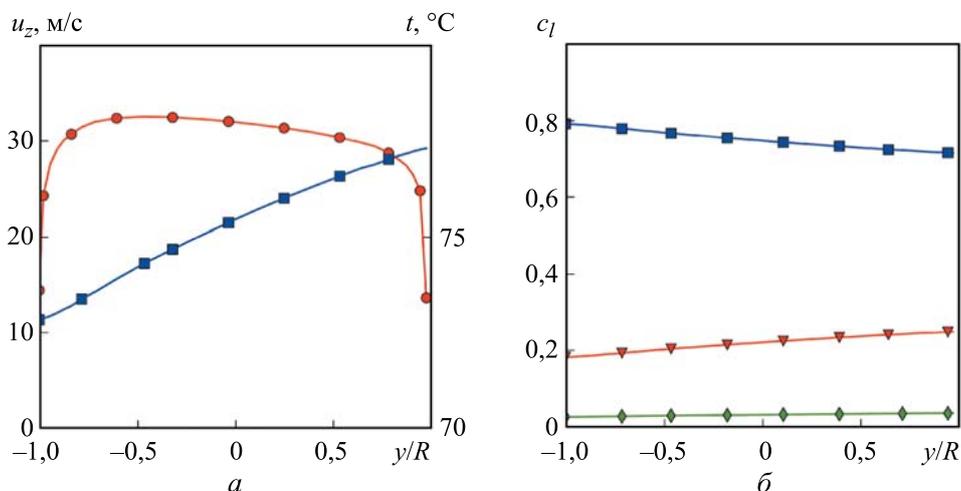


Рис. 8. Профили безразмерной аксиальной скорости (●), температуры (■) (а) и массовых долей компонентов (CH_4 (■), H_2 (◆), N_2 (▼)) газовой смеси (б) на входе во фрагмент прямой трубы (радиус основной трубы $R = D_1 / 2$)

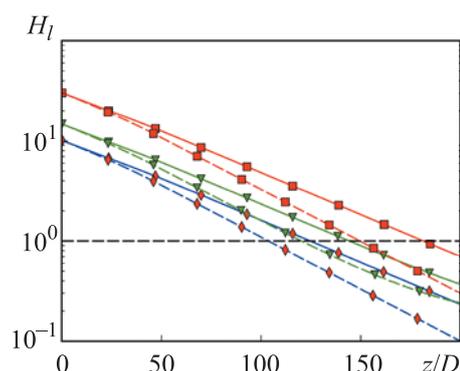


Рис. 9. Распределения параметров неоднородности H_i и H_t по длине прямого фрагмента трубы: сплошные линии — технически гладкая труба, штриховые — труба с шероховатостью $Ra40$; ■ — $H_{\text{H}_2} / H_{\text{N}_2}$; ◆ — H_{CH_4} ; ▼ — H_t

Отметим, что учет шероховатости приводит не только к улучшению смешения энтальпии и компонентов, но и к увеличению перепада давления: $\Delta p_1 = 9,6$ кПа (технически гладкая труба), $\Delta p_2 = 14,3$ кПа (труба с шероховатостью $Ra40$) на трубе длиной $20D_1$.

Выводы. В результате численных исследований установлено, что при смешении в тройниковом соединении топливных газов — метана с массовым расходом 10 кг/с и температурой 60 °С (основная труба диаметром 254 мм) и смеси трех газов с расходом смеси 10 кг/с и температурой 90 °С (боковая труба диаметром D_2) — можно достигнуть требуемой однородности состава и температуры смеси: при $D_2 / D_1 = 0,63$ на расстоянии $20D_1$ от начала смешения; при $D_2 / D_1 = 1,0$ в прямолинейном фрагменте ос-

новой технически гладкой трубы на расстоянии $200D_1$ от начала смешения. Использование прямого фрагмента трубы с шероховатостью внутренней поверхности Ra40 может сократить общую длину основной трубы примерно на 15 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M., ed. Handbook of industrial mixing. Wiley, 2004.
- [2] Ghanem A., Lemenand T., della Valle D., et al. Static mixers: mechanisms, applications, and characterization methods — a review. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2014, vol. 92, iss. 2, pp. 205–228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.013>
- [3] Khokhar Z.H.I., Al-Harhi M.A., Abusharkh B.F., et al. Heat and mass transfer mixing enhancements in pipe-line; numerical CFD and experimental chores: a review. *IJESIT*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 1–11.
- [4] Evrim C., Chu X., Silber F.E., et al. Flow features and thermal stress evaluation in turbulent mixing flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2021, vol. 178, art. 121605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121605>
- [5] Evrim C., Chu X., Laurien E. Analysis of thermal mixing characteristics in different T-junction configurations. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2020, vol. 158, art. 120019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120019>
- [6] Smith B.L., Mahaffy J.H., Angele K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction. *Nucl. Eng. Des.*, 2013, vol. 264, pp. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.030>
- [7] Utanohara Y., Miyoshi Y.K., Nakamura A. Conjugate numerical simulation of wall temperature fluctuation at a T-junction pipe. *MEJ*, 2018, vol. 5, iss. 3, pp. 18-00044. DOI: <https://doi.org/10.1299/mej.18-00044>
- [8] Tuponosov F.V., Artemov V.I., Yankov G.G., et al. Simulation of mixing of single-phase fluids in T-junctions. *Therm. Eng.*, 2023, vol. 70, no. 9, pp. 673–692. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601523090070>
- [9] Forney L.J., Lee H.C. Optimum dimensions for pipeline mixing at a T-junction. *AIChE J.*, 1982, vol. 28, iss. 6, pp. 980–987. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690280613>
- [10] Ger A.M., Holley E.R. Turbulent jets in crossing pipe flow. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1974.
- [11] Ger A.M., Holley E.R. Comparison of single-point injections in pipe flow. *J. Hydraulics Division*, 1976, vol. 102, no. 6, pp. 731–746. DOI: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004554>
- [12] Maruyama T., Suzuki S. Pipeline mixing between two fluid streams meeting at a T-junction. *Int. Chem. Eng.*, 1981, vol. 21, no. 2, pp. 205–212.

- [13] Forney L.J., Kwon T.C. Efficient single-jet mixing in turbulent tube flow. *AIChE J.*, 1979, vol. 25, iss. 4, pp. 623–630. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690250408>
- [14] O’Leary C.D., Forney L.J. Optimization of in-line mixing at a 90° tee. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1985, vol. 24, iss. 2, pp. 332–338. DOI: <https://doi.org/10.1021/i200029a019>
- [15] Chen S.H., Ou J.J., Dukat A.J., et al. Dynamics of fluid mixing at a T-junction with implications on natural gas processing. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1990, vol. 29, iss. 8, pp. 1690–1695. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie00104a018>
- [16] Igarashi M., Tanaka M., Kawashima S., et al. Experimental study on fluid mixing for evaluation of thermal striping in T-pipe junction. *10th Int. Conf. on Nuclear Engineering*, 2002, pp. 383–390. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE10-22255>
- [17] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1974, vol. 3, iss. 2, pp. 269–289. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [18] Kader B.A. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 1981, vol. 24, iss. 9, pp. 1541–1544. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90220-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90220-9)
- [19] Wilke C.R. A viscosity equation for gas mixtures. *J. Chem. Phys.*, 1950, vol. 18, iss. 4, pp. 517–519. <https://doi.org/10.1063/1.1747673>
- [20] Mason E.A., Saxena S.C. Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures. *Phys. Fluids*, 1958, vol. 1, iss. 5, pp. 361–369. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1724352>
- [21] Wang X., Feng Z., Forney L.J. Computational simulation of turbulent mixing with mass transfer. *Comput. Struct.*, 1999, vol. 70, iss. 4, pp. 447–465. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00160-6)
- [22] Jayatilke C.L.V. The influence of Prandtl number and surface roughness on the resistance of the laminar sublayer to momentum and heat transfer. *Prog. Heat Mass Transfer*, 1969, vol. 1, pp. 193–321.

Тупоносков Филипп Владимирович — аспирант кафедры «Общей физики и ядерного синтеза» НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1).

Артемов Валерий Иванович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Инженерная теплофизика» НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1).

Яньков Георгий Глебович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Инженерная теплофизика» НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1).

Дедов Алексей Викторович — д-р техн. наук, директор Института тепловой и атомной энергетики НИУ «МЭИ» (Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тупоносов Ф.В., Артемов В.И., Янков Г.Г. и др. Численный анализ эффективности смешения топливных газов в тройниковом соединении при изменениях диаметра боковой трубы и угла ее врезки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 3 (114), с. 115–132. EDN: SEFVZP

**NUMERICAL ANALYSIS OF EFFICIENCY OF MIXING
THE FUEL GASES IN A T-JOINT WITH THE LATERAL
PIPE DIAMETER AND ITS INSERTION ANGLE ALTERATION**

F.V. Tuponosov

tuponosov@gmail.com

V.I. Artemov

viartemov@yandex.ru

G.G. Yankov

yankovgg@mail.ru

A.V. Dedov

dedovav@mpei.ru

National Research University “MPEI”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents numerical study of the processes in mixing the multicomponent gas flows in a T-joint with the lateral pipe different diameters and its insertion angle of 90°. Methane with the mass flow rate of 10 kg/s and temperature of 60 °C was supplied to the main pipe with the $D_1 = 254$ mm diameter. The mixture of three gases (methane, hydrogen and nitrogen) with the $r_{\text{CH}_4} = r_{\text{H}_2} = 0.4$, $r_{\text{N}_2} = 0.2$, mole fractions, mixture flow rate of 10 kg/s and temperature of 90 °C was supplied to the secondary pipe. The lateral pipe diameter was varying in the $D_2 = (0.6–1.0)D_1$ range. Fields of speed, temperature and mass fractions of the mixture components in the main pipe were obtained for the different D_2 / D_1 values. The D_2 / D_1 optimal value was determined, ensuring the required composition homogeneity and mixture temperature in the main pipe at the $20D_1$ distance the mixing start. Simulation was also performed for a T-joint with pipes of the same D_1 diameter and the 60° lateral pipe insertion angle. The paper shows that

Keywords

T-joint, mixing, gas component, lateral pipe diameter, insertion angle, turbulent diffusion, inhomogeneities degeneration

such insertion angle significantly improves the mixing quality in a T-joint. For a T-joint with $D_2/D_1 = 1$, the length of the main pipe additional fragments (technically smooth, Ra40 roughness) were determined, ensuring the required gas mixture composition homogeneity and temperature

Received 13.06.2023

Accepted 31.07.2023

© Author(s), 2024

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of State Task no. FSWF-2023-0017 (agreement no. 075-03-2023-383 from 01/18/2023) in the field of scientific activity for 2023–2025

REFERENCES

- [1] Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M., ed. Handbook of industrial mixing. Wiley, 2004.
- [2] Ghanem A., Lemenand T., della Valle D., et al. Static mixers: mechanisms, applications, and characterization methods — a review. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2014, vol. 92, iss. 2, pp. 205–228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.013>
- [3] Khokhar Z.H.I., Al-Harhi M.A., Abusharkh B.F., et al. Heat and mass transfer mixing enhancements in pipe-line; numerical CFD and experimental chores: a review. *IJESIT*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 1–11.
- [4] Evrim C., Chu X., Silber F.E., et al. Flow features and thermal stress evaluation in turbulent mixing flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2021, vol. 178, art. 121605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121605>
- [5] Evrim C., Chu X., Laurien E. Analysis of thermal mixing characteristics in different T-junction configurations. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2020, vol. 158, art. 120019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120019>
- [6] Smith B.L., Mahaffy J.H., Angele K. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction. *Nucl. Eng. Des.*, 2013, vol. 264, pp. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.030>
- [7] Utanohara Y., Miyoshi Y.K., Nakamura A. Conjugate numerical simulation of wall temperature fluctuation at a T-junction pipe. *MEJ*, 2018, vol. 5, iss. 3, pp. 18-00044. DOI: <https://doi.org/10.1299/mej.18-00044>
- [8] Tuponosov F.V., Artemov V.I., Yankov G.G., et al. Simulation of mixing of single-phase fluids in T-junctions. *Therm. Eng.*, 2023, vol. 70, no. 9, pp. 673–692. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601523090070>
- [9] Forney L.J., Lee H.C. Optimum dimensions for pipeline mixing at a T-junction. *AIChE J.*, 1982, vol. 28, iss. 6, pp. 980–987. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690280613>
- [10] Ger A.M., Holley E.R. Turbulent jets in crossing pipe flow. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1974.

- [11] Ger A.M., Holley E.R. Comparison of single-point injections in pipe flow. *J. Hydraulics Division*, 1976, vol. 102, no. 6, pp. 731–746.
DOI: <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004554>
- [12] Maruyama T., Suzuki S. Pipeline mixing between two fluid streams meeting at a T-junction. *Int. Chem. Eng.*, 1981, vol. 21, no. 2, pp. 205–212.
- [13] Forney L.J., Kwon T.C. Efficient single-jet mixing in turbulent tube flow. *AIChE J.*, 1979, vol. 25, iss. 4, pp. 623–630. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690250408>
- [14] O’Leary C.D., Forney L.J. Optimization of in-line mixing at a 90° tee. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1985, vol. 24, iss. 2, pp. 332–338.
DOI: <https://doi.org/10.1021/i200029a019>
- [15] Chen S.H., Ou J.J., Dukat A.J., et al. Dynamics of fluid mixing at a T-junction with implications on natural gas processing. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1990, vol. 29, iss. 8, pp. 1690–1695. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie00104a018>
- [16] Igarashi M., Tanaka M., Kawashima S., et al. Experimental study on fluid mixing for evaluation of thermal striping in T-pipe junction. *10th Int. Conf. on Nuclear Engineering*, 2002, pp. 383–390. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE10-22255>
- [17] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1974, vol. 3, iss. 2, pp. 269–289.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- [18] Kader B.A. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, 1981, vol. 24, iss. 9, pp. 1541–1544.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90220-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90220-9)
- [19] Wilke C.R. A viscosity equation for gas mixtures. *J. Chem. Phys.*, 1950, vol. 18, iss. 4, pp. 517–519. <https://doi.org/10.1063/1.1747673>
- [20] Mason E.A., Saxena S.C. Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures. *Phys. Fluids*, 1958, vol. 1, iss. 5, pp. 361–369.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1724352>
- [21] Wang X., Feng Z., Forney L.J. Computational simulation of turbulent mixing with mass transfer. *Comput. Struct.*, 1999, vol. 70, iss. 4, pp. 447–465.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(98\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00160-6)
- [22] Jayatilke C.L.V. The influence of Prandtl number and surface roughness on the resistance of the laminar sublayer to momentum and heat transfer. *Prog. Heat Mass Transfer*, 1969, vol. 1, pp. 193–321.

Tuponosov F.V. — Post-Graduate Student, Department of General Physics and Nuclear Fusion, National Research University “MPEI” (Krasnokazarmennaya ul. 14, str. 1, Moscow, 111250 Russian Federation).

Artemov V.I. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Thermal Engineering, National Research University “MPEI” (Krasnokazarmennaya ul. 14, str. 1, Moscow, 111250 Russian Federation).

Yankov G.G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Engineering Thermal Physics, National Research University “MPEI” (Krasnokazarmennaya ul. 14, str. 1, Moscow, 111250 Russian Federation).

Dedov A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Director of the Institute of Thermal and Nuclear Energy, National Research University “MPEI” (Krasnokazarmennaya ul. 14, str. 1, Moscow, 111250 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Tuponosov F.V., Artemov V.I., Yankov G.G., et al. Numerical analysis of efficiency of mixing the fuel gases in a T-joint with the lateral pipe diameter and its insertion angle alteration. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 3 (114), pp. 115–132 (in Russ.). EDN: SEFVZP