

ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ТРОЙНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ТУПИКОВЫМИ ОТВЕТВЛЕНИЯМИ МЕТОДАМИ PIV И LDV

Д.А. Дедов

ORCID: 0009-0008-6727-6358 e-mail: dedovdda@yandex.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

А.В. Логинов

ORCID: 0009-0007-8167-2341 e-mail: loginov_av@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

В.А. Семашко

ORCID: 0009-0002-3781-7172 e-mail: semashko_va@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

В.П. Крепков

ORCID: 0009-0003-1288-1810 e-mail: krepkovvp@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

А.В. Будников

ORCID: 0000-0002-5305-6134 e-mail: avbudnikov@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

Проведены комплексные исследования в развитие международного бенчмарка 2023 г. по изучению теплогидравлических процессов, протекающих в тройниковых соединениях с тупиковыми ответвлениями, подверженных термопульсациям, отрицательно сказывающимся на надежности и долговечности конструкций и ведущим к термической усталости материалов трубопроводов. Целью бенчмарка было получение валидационной базы данных для проведения CFD-расчетов. Для получения более полной картины процессов в соединении использованы бесконтактные методы – PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) и тепловизор. По результатам испытаний получены осредненные по времени поля скорости в исследуемом объеме, а также профили вертикальной компоненты скорости V_y в сечениях ответвления. Результаты исследования планируется использовать для верификации CFD-кодов.

Ключевые слова: термическая усталость; термопульсации; Т-образные соединения; PIV и LDV методы; поле скорости; профили скорости.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дедов, Д.А. Измерение гидродинамических характеристик в тройниковых соединениях с тупиковыми ответвлениями методами PIV и LDV / Д.А. Дедов, А.В. Логинов, В.А. Семашко, В.П. Крепков, А.В. Будников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 57-67. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_57
EDN: AABHFK

PIV & LDV HYDRODYNAMIC MEASUREMENTS IN DEAD LEG T-JUNCTIONS

D.A. Dedov

ORCID: **0009-0008-6727-6358** e-mail: **dedovdd@yandex.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Loginov

ORCID: **0009-0007-8167-2341** e-mail: **loginov_av@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Semashko

ORCID: **0009-0002-3781-7172** e-mail: **semashko_va@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

V.P. Krepkov

ORCID: **0009-0003-1288-1810** e-mail: **krepkovvp@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Budnikov

ORCID: **0000-0002-5305-6134** e-mail: **avbudnikov@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of comprehensive research in the development of a 2023 international benchmark for the study of thermal-hydraulic processes occurring in dead leg T-junctions subject to thermal pulsations, which negatively affect the reliability and durability of structures and lead to thermal fatigue of pipeline materials. The purpose of the benchmark was to obtain a validation database for CFD calculations. Non-contact methods – PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) and thermal imaging are used to obtain a more complete picture of the processes in the junctions. Based on the test results, time-averaged velocity fields were obtained in the studied volume, as well as profiles of the vertical velocity component Vy in the branch sections. The obtained results will be used to verify CFD codes.

Key words: thermal fatigue; thermal pulsations; T-junctions; PIV and LDV methods; velocity field; velocity profiles.

FOR CITATION: D.A. Dedov, A.V. Loginov, V.A. Semashko, V.P. Krepkov, and A.V. Budnikov. PIV & LDV hydrodynamic measurements in dead leg t-junctions. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 57-67. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_57 EDN: AABHFK

Введение

Тройниковые соединения с тупиковыми ветками (Dead Leg T-junctions) широко распространены на атомных и тепловых станциях. Каждый контур теплоносителя соединен со множеством вспомогательных контуров систем, которые при нормальной эксплуатации не используются и перекрыты клапанами. Наглядными примерами являются система аварийного охлаждения реактора и система аварийного ввода бора.

Особенностью соединений данного типа является разность скоростей между потоками основного и тупикового участков. Она приводит к формированию проникающих вихрей,

направленных вдоль оси ответвления и переносящих теплоноситель основного потока вглубь глухого ответвления. При значительной разнице температур между теплоносителем и водой в ответвлении на стенках трубопровода в соединении возникают термические пульсации. Если при этом тупиковое ответвление расположено сверху основного участка, данные пульсации незначительны, так как в результате конвективного теплообмена горячая вода теплоносителя поднимается в глухой участок, выравнивая температуры потоков. Более важным для изучения является случай Т-образного соединения, в котором ответвление расположено снизу от оси основного потока. При такой геометрии в нижней части глухого участка формируется застойная зона с холодной водой, и разность температур между потоками сохраняется. Так, например, во втором контуре реактора *Phenix* в период с 1987 по 1990 гг. наблюдались случаи утечки натрия через сквозные трещины в соединениях типа *Dead Leg*. Последующий анализ показал, что причиной этих повреждений стала именно термическая усталость материала стенки трубопровода, накопленная под действием описанных выше термопульсаций [1].

Для изучения термической усталости, возникающей в Т-образных соединениях, в 2023 г. был проведен международный бенчмарк, конечной целью которого являлось получение валидационной базы данных для проведения CFD (Computational Fluid Dynamics) расчетов [2]. Работа, описанная в данной статье, проводилась в развитие бенчмарка, с целью провести более комплексные исследования с использованием бесконтактных методов – PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) и тепловизора. Для этого была разработана особая сменная конструкция исследуемого участка, выполненного из оргстекла.

В данной статье приводятся результаты исследований, проведенных на экспериментальном стенде с использованием PIV- и LDV-систем, а также результаты кроссвалидации между этими двумя методами.

Описание экспериментального стенда и исследуемой модели

Конструктивное исполнение экспериментальной модели представлено на рис. 1.

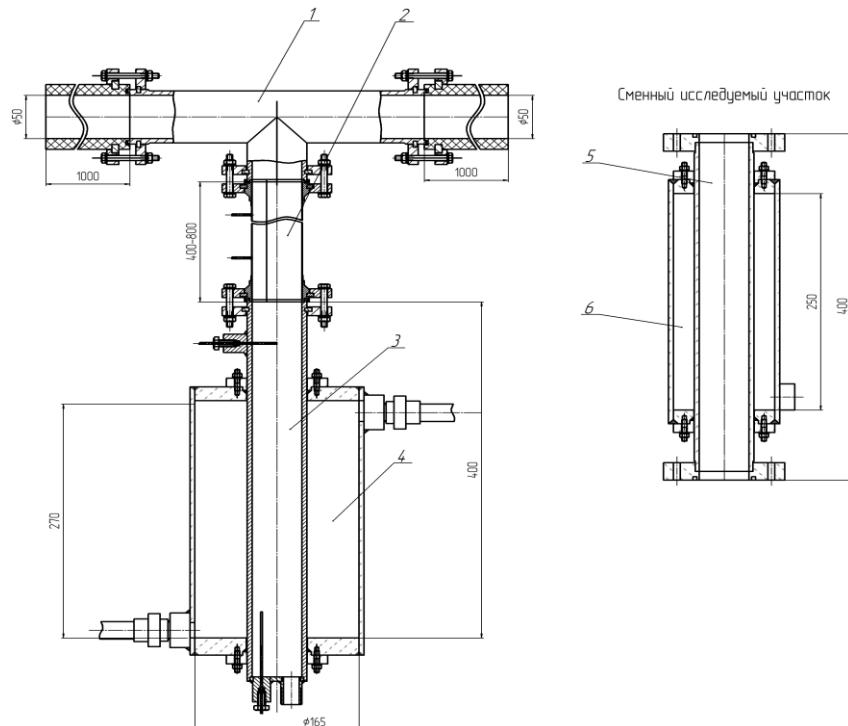


Рис. 1. Конструктивное исполнение модели

Fig. 1. Design of the model

Тройниково соединение труб диаметром 50 мм (поз. 1) горизонтальным участком при соединено к замкнутому контуру циркуляции теплоносителя. Исследуемым каналом является вертикальный тупиковый участок с застойной водой (поз. 2) – он стыкуется с охлаждающим участком (поз. 3), к которому в бак-холодильник (поз. 4) подводится вода температурой 10–11 °C. Применением методик PIV и LDV обусловлены некоторые особенности конструкции исследуемого участка. В целях уменьшения оптических искажений и повышения удобства при калибровке лазерных систем, участок, выполненный из оргстекла (поз. 5), помещен в прозрачную прямоугольную камеру (поз. 6), заполненную технической водой. Сменное исполнение позволяет разместить прозрачный участок в горизонтальной части модели для предварительного изучения профилей скорости потока, поступающего в тройниковое соединение.

Испытания проводились при расходах 10 м³/ч, 21 м³/ч и 40 м³/ч, температурах $T_e = 60$ °C для движущегося потока горизонтального участка, и $T_x = 17$ °C для стоячей воды тупикового вертикального ответвления. Допустимые отклонения параметров расхода и температуры при измерениях методом PIV составляли 0,05 м³/ч и 0,5 °C соответственно. Метод LDV требует больше времени для получения информации о скорости в каждой точке выбранного сечения – по этой причине допустимые отклонения по температуре для него составили около 2 °C.

Описание систем измерений

Для исследования гидродинамики протекающих в модели процессов применены методы лазерной анемометрии PIV и LDV. Метод PIV использовался для получения осредненной по времени картины поля скорости в исследуемом участке, а также вертикальных и горизонтальных профилей осредненной во времени вертикальной компоненты скорости (V_y). Для проведения исследований использована система LaVision на основе импульсного лазера NANO L PIV 135-15 с полиамидными частицами размером 10-30 мкм в качестве трассера. Метод LDV, реализованный лазерной доплеровской измерительной системой ЛАД-05 производства ИТ СО РАН, дублировал измерения скорости для подтверждения работоспособности PIV – системы и обеспечения возможности кроссвалидации.

По причине ограниченности рабочего поля камеры, используемой в методе PIV, модель была условно разделена на две исследуемые зоны: $y = 145\text{--}220$ мм и $y = 195\text{--}270$ мм от центральной оси тройникового соединения. Ниже $y = 270$ мм начинается зона стоячей воды с практически полным отсутствием тепло- и массопереноса. Вертикальные профили V_y строились с шагом $\Delta x = 5$ мм, начиная от левой стенки модели $x = 0$ мм. Горизонтальные профили V_y строились с шагом $\Delta y = 5$ мм, начиная от верхней границы первой зоны $y = 145$ мм, с увеличением шага до $\Delta y = 10$ мм, начиная с $y = 175$ мм, где осевые вихри становятся менее интенсивными. На рис. 2 изображена исследуемая модель с отмеченными на ней зонами измерений и линиями, проводимыми для построения профилей сечений. Центр тройникового соединения, таким образом, имеет координаты $x = 25$ мм, $y = 0$ мм.

Результаты измерений

Перед проведением исследований непосредственно в соединении типа *Dead Leg* необходимо произвести предварительное измерение для определения профилей скорости и СКО на входе в канал. Для этого сменный исследуемый участок был размещен горизонтально – по оси течения горячего потока. Измерения выполнялись методом PIV, для построения профилей была выбрана линия сечения на расстоянии $\Delta x = 450$ мм от центра тройникового соединения. Профили скорости и СКО в вертикальном сечении на входе в канал приведены на рис. 3. Видно, что при всех выбранных расходах профиль скорости близок к равномерному практически по всей высоте канала.

Далее представлены осредненные по времени поля скорости для участков $y = 145\text{--}220$ мм и $y = 195\text{--}270$ мм при параметрах температуры $T_e = 60$, $T_x = 17$ °C. Рис. 4 и 5 соответствуют расходу 10 м³/ч, рис. 6 и 7 соответствуют расходу 40 м³/ч.

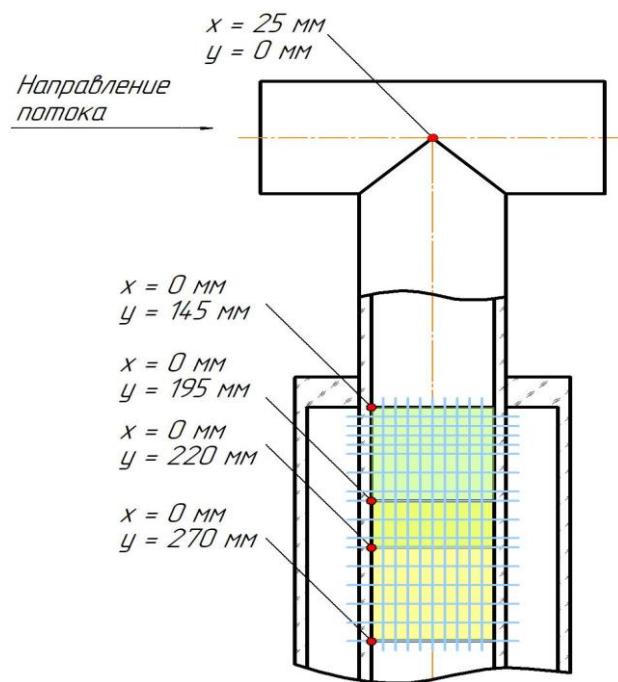


Рис. 2. Расположение рабочих зон и линий сечений

Fig. 2. Location of work areas and section lines

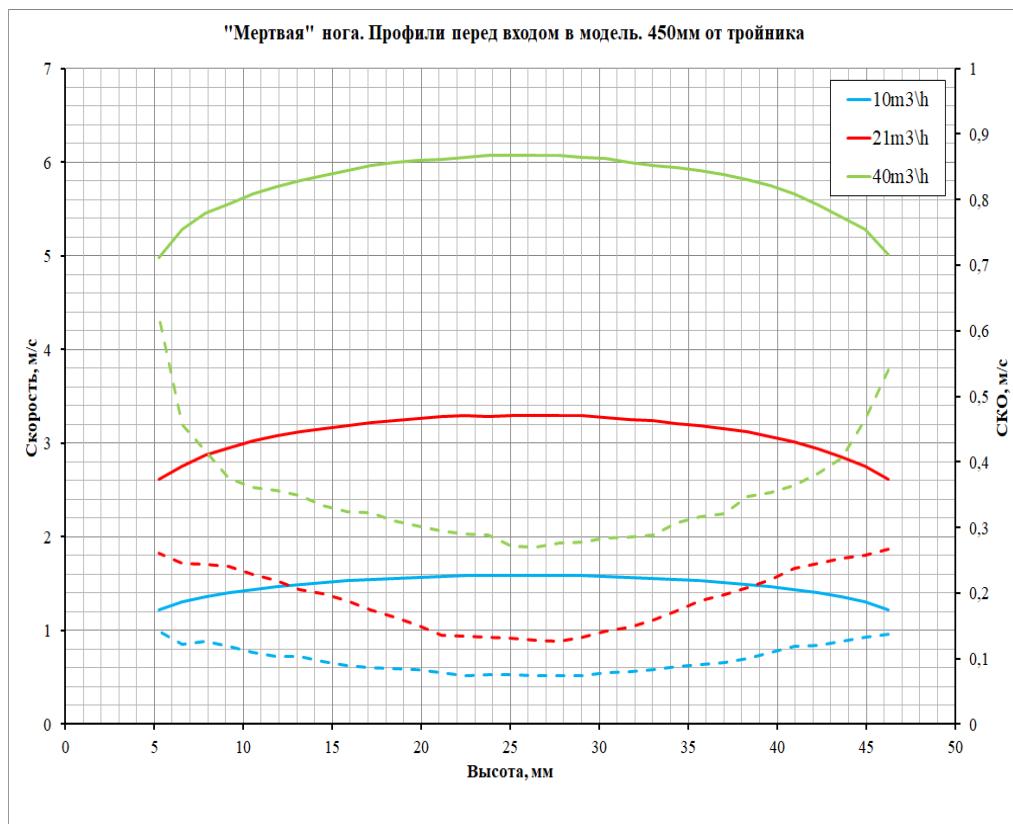


Рис. 3. Профили скорости и СКО на входе в горизонтальный участок

Fig. 3. Velocity profiles and standard deviation at the entrance to the horizontal section

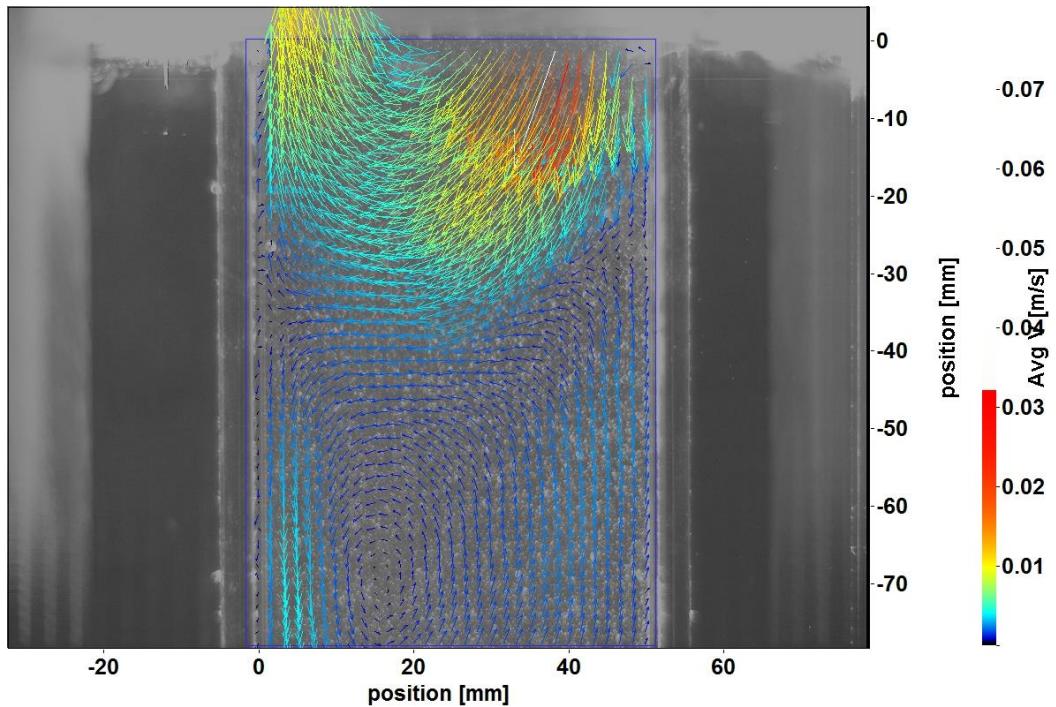


Рис. 4. Осредненное поле скорости: $y = 145\text{--}220 \text{ мм}$; $T_g = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$

Fig. 4. Average velocity field: $y = 145\text{--}220 \text{ mm}$; $T_g = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$

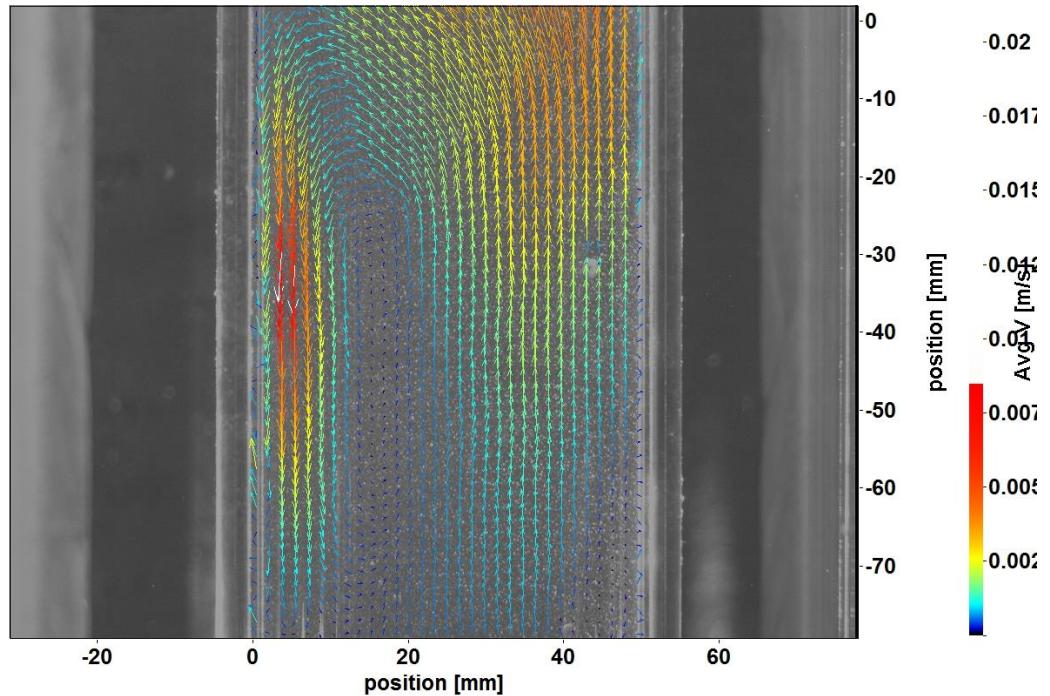


Рис. 5. Осредненное поле скорости: $y = 195\text{--}270 \text{ мм}$; $T_g = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$

Fig. 5. Average velocity field: $y = 195\text{--}270 \text{ mm}$; $T_g = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$

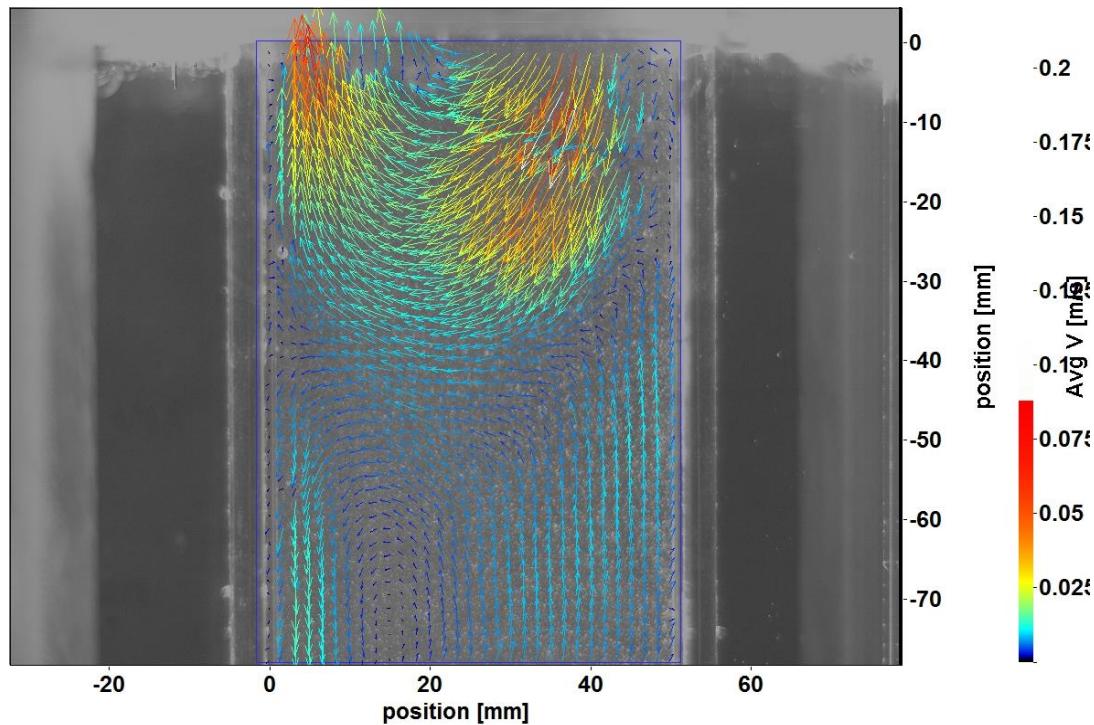


Рис. 6. Осредненное поле скорости: $y = 145\text{-}220 \text{ мм}$; $T_{\Gamma} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$

Fig. 6. Average velocity field: $y = 145\text{-}220 \text{ mm}$; $T_{\Gamma} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$

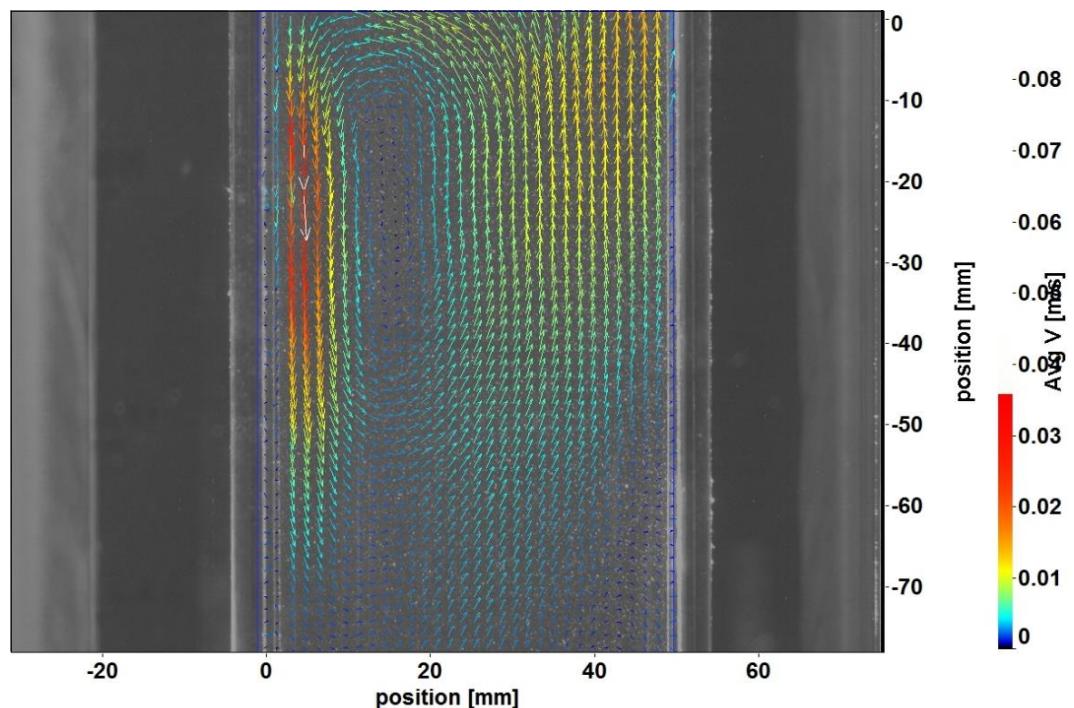


Рис. 7. Осредненное поле скорости: $y = 195\text{-}270 \text{ мм}$; $T_{\Gamma} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$

Fig. 7. Average velocity field: $y = 195\text{-}270 \text{ mm}$; $T_{\Gamma} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_x = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$

На рис. 4 и 6, соответствующих съемкам в верхней зоне исследуемого участка, отчетливо видно завершение осевого вихря, переносящего среду с повышенными параметрами из горизонтального потока. В нижней же зоне наблюдается некоторый «вторичный» вихрь, возникающий в стоячей воде ответвления под воздействием основного. Дальнейшие рис. 8-11 представляют собой построенные с осредненным по времени поля скорости горизонтальные и вертикальные профили на каждом участке для обоих выбранных расходов.

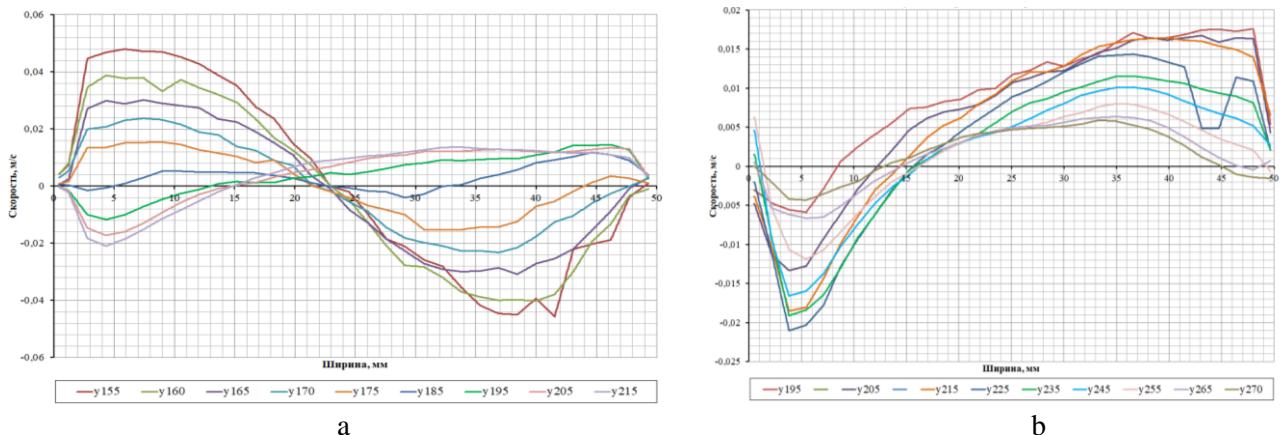


Рис. 8. Горизонтальные профили Vy: Q = 10 м³/ч; y = 145-220 мм (а); y = 195-270 мм (б)

Fig. 8. Horizontal profiles Vy: Q = 10 m³/h; y = 145-220 mm (a); y = 195-270 mm (b)

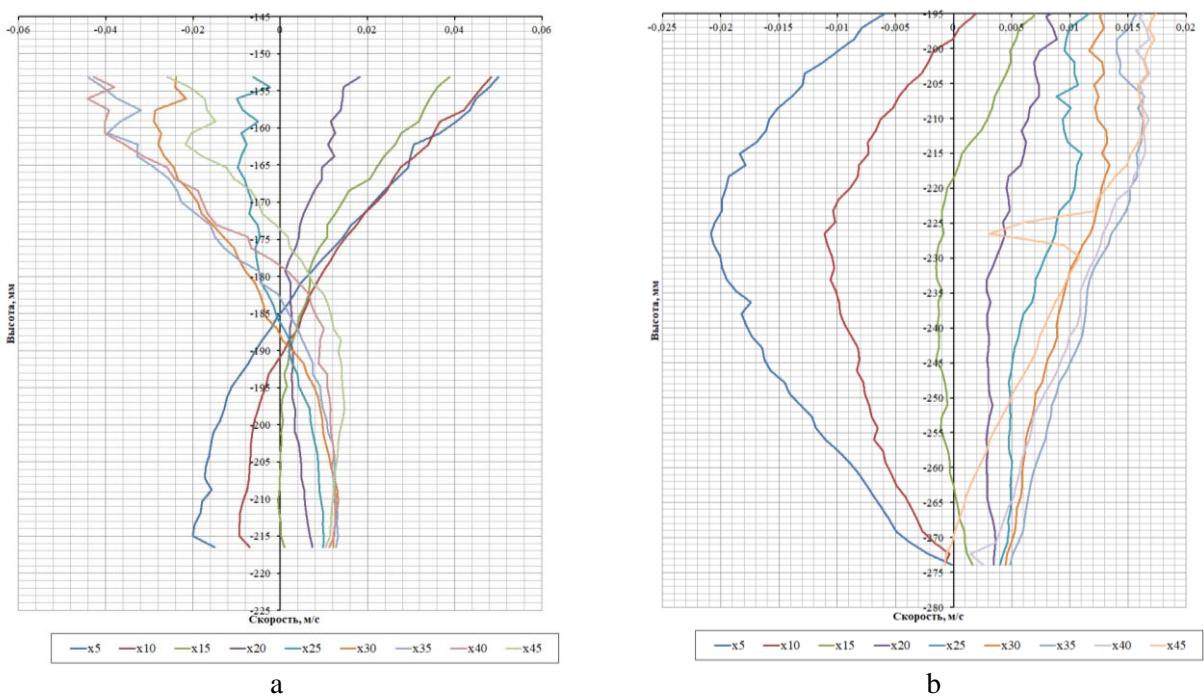


Рис. 9. Вертикальные профили Vy: Q = 10 м³/ч; y = 145-220 мм (а); y = 195-270 мм (б)

Fig. 9. Vertical profiles Vy: Q = 10 m³/h; y = 145-220 mm (a); y = 195-270 mm (b)

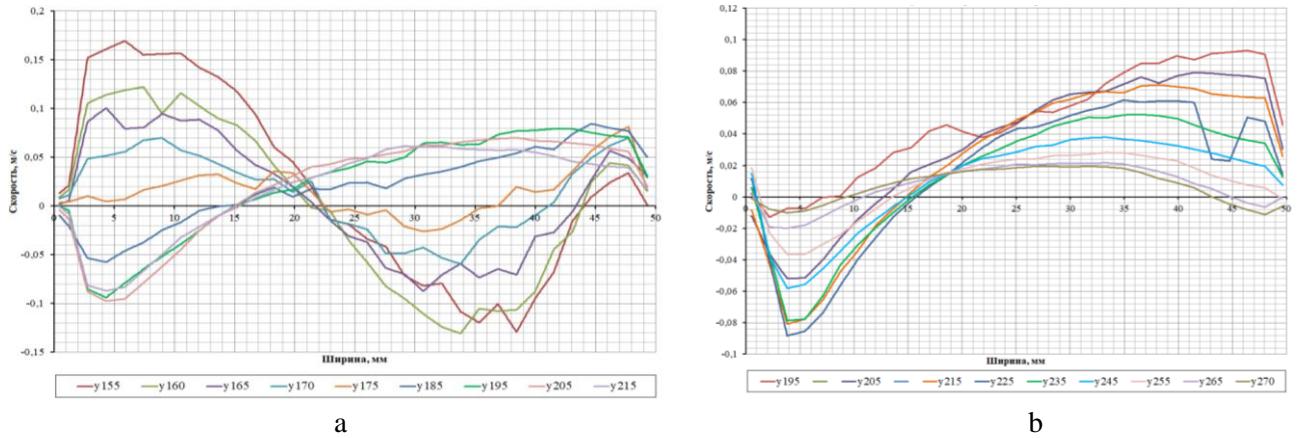


Рис. 10. Горизонтальные профили V_y : $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$; $y = 145\text{-}220 \text{ мм}$ (а); $y = 195\text{-}270 \text{ мм}$ (б)

Fig. 10. Horizontal profiles V_y : $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$; $y = 145\text{-}220 \text{ mm}$ (a); $y = 195\text{-}270 \text{ mm}$ (b)

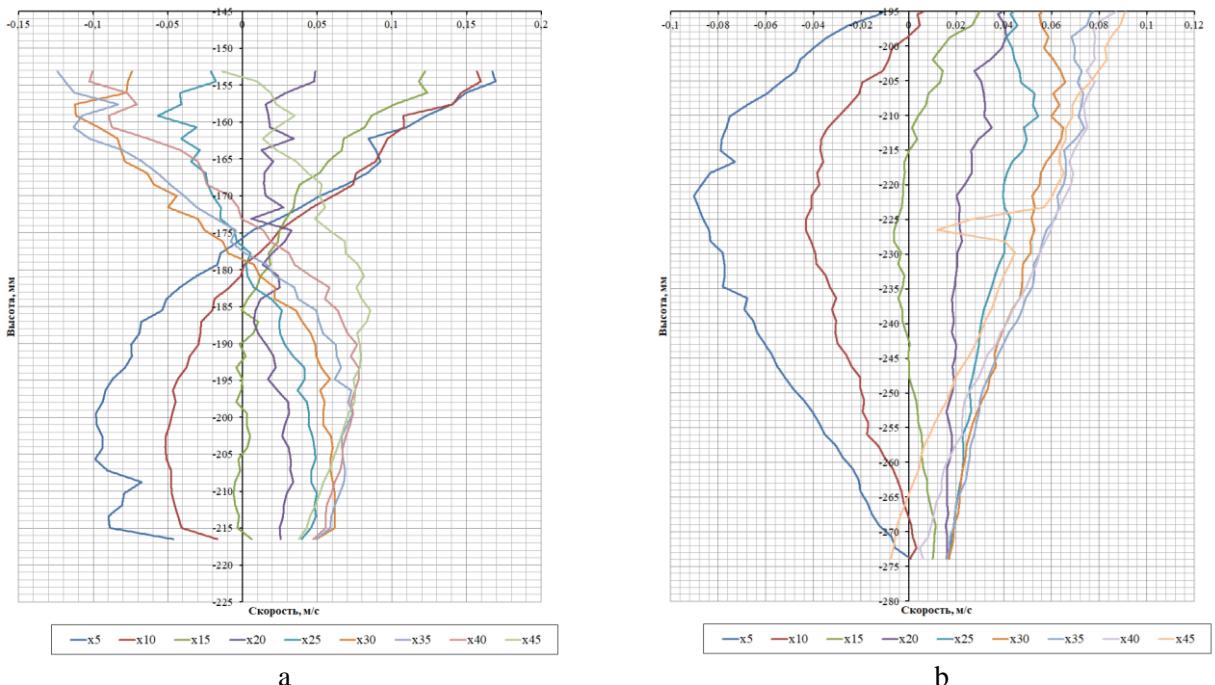


Рис. 11. Вертикальные профили V_y : $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$; $y = 145\text{-}220 \text{ мм}$ (а); $y = 195\text{-}270 \text{ мм}$ (б)

Fig. 11. Vertical profiles V_y : $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$; $y = 145\text{-}220 \text{ mm}$ (a); $y = 195\text{-}270 \text{ mm}$ (b))

Для проверки полученных результатов и подтверждения работоспособности метода PIV в условиях исследуемой модели были проведены дополнительные измерения вертикальных профилей V_y методом LDV. Результаты представлены на рис. 12. Данный метод не требует разбиения исследуемого участка на рабочие зоны, однако он не позволяет получить картину поля скорости, предоставляя только значения в конкретных точках. Этим частично объясняется некоторое различие при сравнении результатов, полученных методами PIV и LDV. Сравнение производилось по всем исследуемым точкам: на рис. 13 представлены сечения на расстояниях $\Delta x = 5 \text{ мм}, 10 \text{ мм}, 35 \text{ мм}$ – наиболее показательные, охватывающие оба осевых вихря.

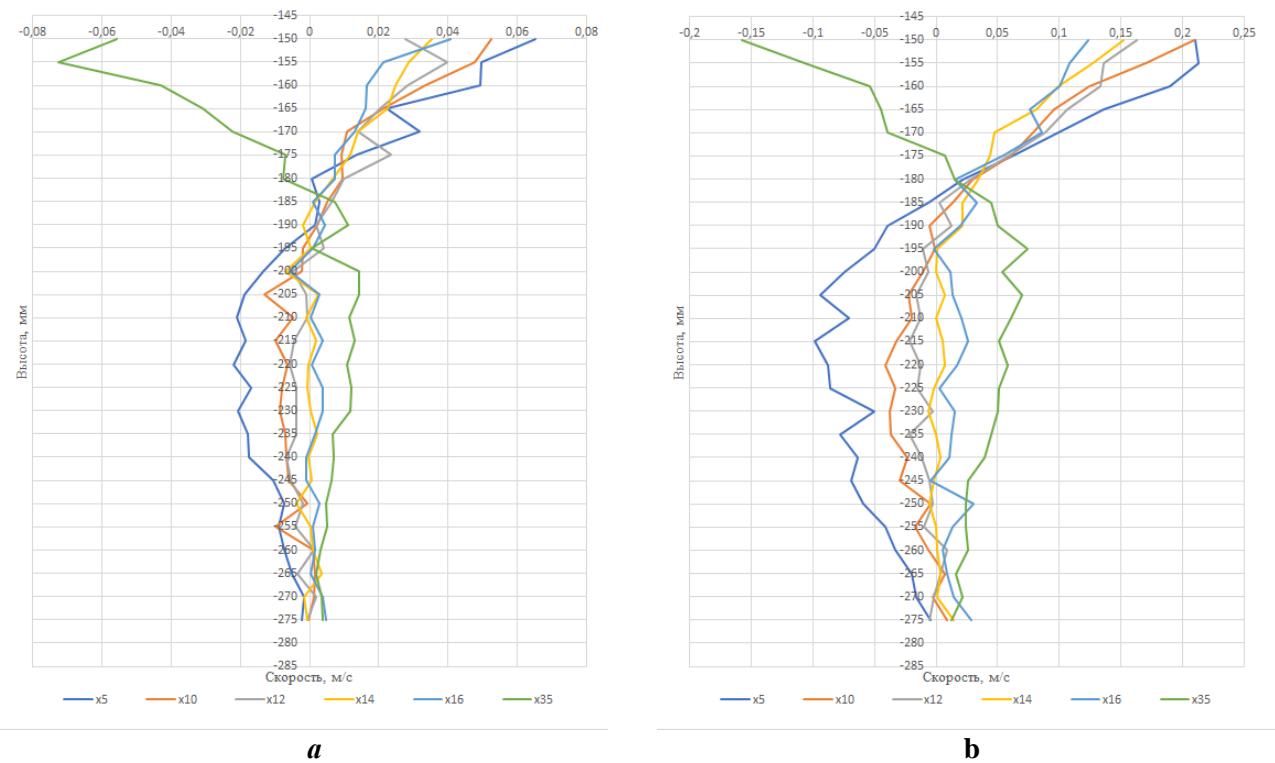


Рис. 12. Вертикальные профили V_y (LDV): $y = 145\text{--}275 \text{ мм}$; $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ (а); $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ (б)

Fig. 12. Vertical profiles V_y (LDV): $y = 145\text{--}275 \text{ mm}$; $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ (a); $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ (b)

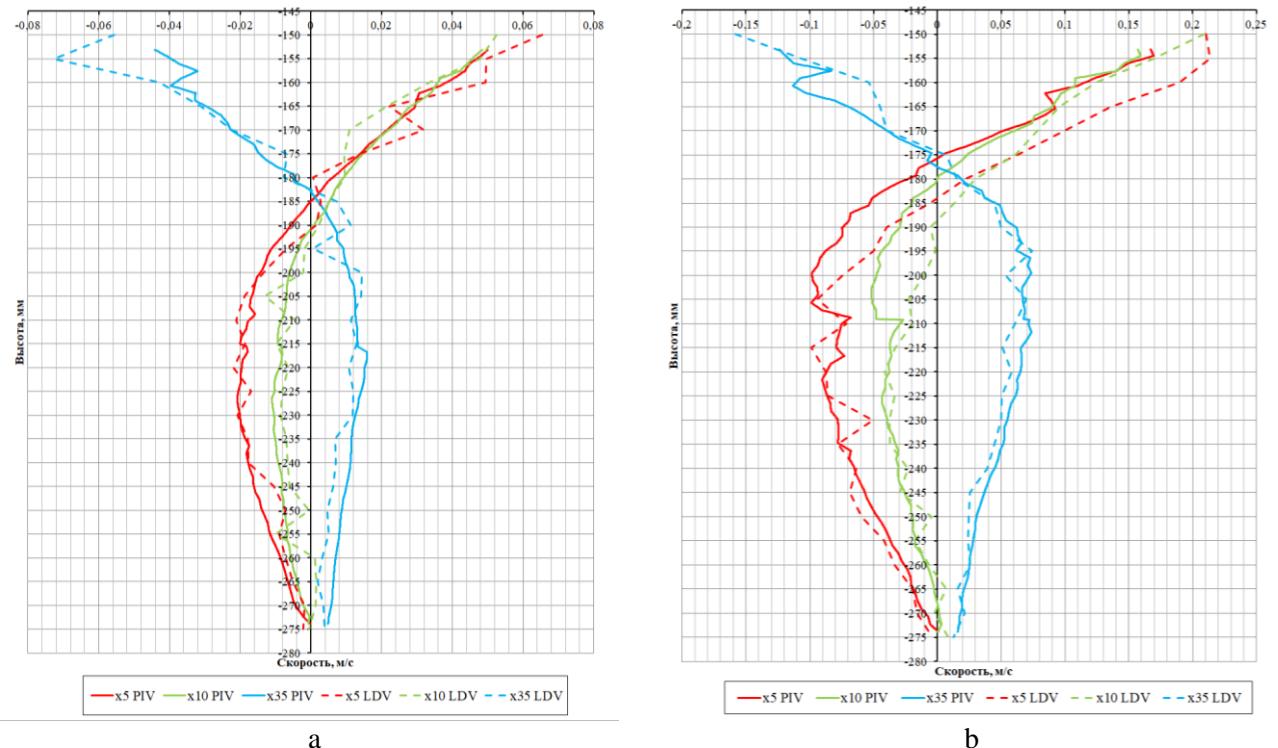


Рис. 13. Сравнение вертикальных профилей V_y , полученных методами PIV и LDV: $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ (а); $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ (б)

**Fig. 13. Comparison of vertical profiles V_y , obtained by PIV and LDV methods:
 $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ (a); $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ (b)**

Заключение

Представлены результаты исследования гидродинамических характеристик процессов, протекающих в тройниковых соединениях с тупиковым ответвлением. Конструктивное исполнение сменного исследуемого участка позволило применить системы лазерной анемометрии для определения скоростей в различных сечениях как вертикального, так и горизонтального каналов. На основе экспериментальных данных метода PIV получены осредненные по времени поля скорости для различных зон тупикового ответвления. Построены вертикальные и горизонтальные профили вертикальной компоненты скорости V_y при различных режимах. Достоверность полученных данных проверена проведением дублирующих измерений методом LDV. Наблюдаемые расхождения могут быть объяснены различиями в принципе действия и количестве предоставляемых для построения профилей данных. Полученные данные планируется использовать для валидации CFD-расчетов при дальнейшем изучении процессов в соединениях типа *Dead Leg*.

Библиографический список

1. **Rahmani, L.** SPX significant events and whether it would have happened on EFR / L. Rahmani, S. Dechelette, C. Bandini // Unusual occurrences during LMFR operation: Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna, 9-13 November 1998. – 1998. – Pp. 57-100.
2. **Angele, K.** NEA/OECD benchmark-experiment for the validation of CFD for mixing and thermal fatigue in T-junction dead leg flows / K. Angele, R. Howard, P. Veber [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2024. – Vol. 417. – Article 112813. – DOI 10.1016/j.nucengdes.2024.112813.

References

1. Rahmani L., Dechelette S. and Bandini C. 1998. “SPX Significant Events and Whether It Would Have Happened on EFR”. In Unusual Occurrences during LMFR Operation: Proceedings of a Technical Committee Meeting Held in Vienna, 9-13 November, 1998, 57-100.
2. Angele, K., Howard R., Veber P. [et al.]. 2024. “NEA/OECD Benchmark-Experiment for the Validation of CFD for Mixing and Thermal Fatigue in T-Junction Dead Leg Flows”. *Nuclear Engineering and Design* 417: 112813. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112813>.

Дата поступления
в редакцию: 20.06.2025

Дата принятия
к публикации: 09.09.2025