

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 532.5

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-2-318-336

**Гидродинамическое взаимодействие двух параллельных
трубопроводов при малых межтрубных расстояниях**

Дмитрий Юрьевич Шерстнев¹, Юлия Вадимовна Брянская²

^{1, 2}Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

¹sherstnevdmittii@yandex.ru

²mgsu-hydraulic@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6233-3690>

Аннотация. Цель: установить влияние малых межтрубных расстояний ($1D-4D$) на структуру течения и гидродинамические нагрузки при обтекании двух параллельных трубопроводов. **Материалы и методы.** Проведены экспериментальные исследования распределения скоростей потока по вертикали в различных поперечных сечениях: на подходе к переходу, в непосредственной близости к трубопроводам, за трубопроводами и в межтрубном пространстве – на гидравлическом канале в лаборатории гидравлики и гидромеханики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. Выполнено численное моделирование процесса обтекания трубопроводного перехода набегающим потоком в программном комплексе ANSYS Fluent. Модели трубопроводов для лабораторного эксперимента были изготовлены из пластика, диаметр моделей составлял 25 мм, шероховатость поверхности моделировалась шлифовальной шкуркой № 100 с эквивалентной высотой выступов шероховатости 100 мкм. При численном моделировании для описания турбулентности использована модель SST, свободная поверхность учитывалась методом VOF. Проведена верификация разработанной математической модели путем сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными при исследовании обтекания трубопровода, расположенного на дне гидравлического лотка. **Результаты.** Установлено, что при межтрубных расстояниях в диапазоне $1D-3D$ за первой трубой формируется следовая зона, сохраняющая значительное влияние на вторую нитку и вызывающая снижение подъемной силы и появление отрицательной продольной составляющей сопротивления. При увеличении межтрубного расстояния до $4D$ наблюдается переход к режиму практически независимого обтекания, сопровождающемуся восстановлением структуры течения перед второй трубой. **Выводы.** Межтрубное расстояние порядка $4D$ может рассматриваться как рациональное для снижения взаимного гидродинамического влияния параллельных ниток подводного трубопровода.

Ключевые слова: подводные трубопроводы, гидродинамическое взаимодействие, межтрубное расстояние ($1D-4D$), моделирование турбулентности, модель SST, метод Volume of Fluid (VOF), ANSYS Fluent, численное моделирование, гидравлический лоток, экспериментальные исследования, подъемная и продольная силы

Источник финансирования: исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Для цитирования: Шерстнев Д. Ю., Брянская Ю. В. Гидродинамическое взаимодействие двух параллельных трубопроводов при малых межтрубных расстояниях // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 2. С. 318–336. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-318-336>.



HYDROTECHNICAL ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Hydrodynamic interaction of two parallel
pipelines with small interpipe distances**

Dmitry Yu. Sherstnev¹, Yulia V. Bryanskaya²

^{1,2}Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow,
Russian Federation

¹sherstnevdmittii@yandex.ru

²mgsu-hydraulic@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6233-3690>

Abstract. Purpose: to determine the effect of small interpipe distances ($1D$ – $4D$) on the flow structure and hydrodynamic loads while flowing round two parallel pipelines. **Materials and methods.** Experimental studies of the vertical flow velocity distribution were conducted in various cross-sections: on the approach to the transition, in a close proximity of the pipelines, behind the pipelines, and in the shell side – on a hydraulic channel in the Hydraulics and Hydromechanics Laboratory of the Moscow State University of Civil Engineering. Numerical simulation of the free-stream flowing round the pipeline crossing with incoming flow was performed using the ANSYS Fluent software package. Pipeline models for the laboratory experiment were made of plastic, the diameter of the models was 25 mm, the surface roughness was simulated using № 100 sandpaper with an equivalent roughness peak height of 100 μm . In numerical simulations, the SST model was used to describe turbulence, and the free surface was taken into account using the VOF method. The developed mathematical model was verified by comparing the numerical simulation results with experimental data obtained in a study of flowing round a pipeline located at the bottom of a hydraulic flume. **Results.** It was found that, for interpipe distances in the $1D$ – $3D$ range, a trace zone forms behind the first pipe, maintaining a significant influence on the second pipe and causing a decrease in uplift force and the appearance of a negative longitudinal induced lift drag component. As the interpipe distance increases to $4D$, a transition to a regime of virtually independent flow is observed, accompanied by the restoration of the flow structure ahead of the second pipe. **Conclusions.** An interpipe distance of approximately $4D$ can be considered rational for reducing the mutual hydrodynamic influence of parallel lines of an underwater pipeline.

Keywords: underwater pipelines, hydrodynamic interaction, intertube distance ($1D$ – $4D$), turbulence modeling, SST model, Volume of Fluid (VOF) method, ANSYS Fluent, numerical simulation, hydraulic flume, experimental studies, uplift and longitudinal forces

Funding source: the study was carried out without external funding.

For citation: Sherstnev D. Yu., Bryanskaya Yu. V. Hydrodynamic interaction of two parallel pipelines with small interpipe distances. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(2):318–336. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-2-318-336>.

Введение. Для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации подводных трубопроводов необходимо проведение комплексных исследований, включающих теоретический анализ, лабораторные эксперименты и численное моделирование. Такой подход позволяет с высокой точностью прогнозировать гидродинамические характеристики водного потока при

его взаимодействии с трубопроводными переходами, а также эффективно снижать риск возникновения аварийных ситуаций [1–6].

Подводные трубопроводы являются критически важными элементами инженерной инфраструктуры и должны обладать высокой надежностью, поскольку их повреждение способно вызвать серьезные экологические и экономические последствия. Одним из ключевых факторов, влияющих на долговечность и устойчивость трубопроводов, является их взаимное пространственное расположение в русле водоема. В частности, изменение расстояния между нитками трубопроводного перехода существенно влияет на характер обтекания, интенсивность турбулентных структур и величину гидродинамических нагрузок [2, 4].

Повышенные пульсационные воздействия и пространственная неравномерность давления вокруг трубопроводов могут вызывать ускоренный износ конструкции. Дополнительными факторами риска являются абразивное воздействие взвешенных частиц и возможность развития коррозионных процессов, что требует применения конструктивных мер защиты [2, 5].

Настоящее исследование направлено на анализ влияния малых межтрубных расстояний по осям трубопроводов: $1D$, $2D$, $3D$ и $4D$ – на структуру течения и распределение гидродинамических нагрузок. Для достижения поставленной цели применено численное моделирование обтекания двух параллельно расположенных труб с последующей верификацией математической модели на основе экспериментальных данных, полученных при лабораторных исследованиях обтекания модели трубопровода в гидравлическом лотке [1–6].

Материалы и методы. Для предотвращения негативных последствий повреждений подводных трубопроводов необходимо проводить комплексные исследования, включающие теоретический анализ, лабораторные эксперименты и численное моделирование. Такой подход позволяет с высокой точностью прогнозировать гидродинамические характери-

стики водного потока при его взаимодействии с трубопроводным переходом и эффективно снижать риск возникновения аварийных ситуаций, обеспечивая безопасность и надежность эксплуатации подводных трубопроводов¹ [7–9].

Экспериментальные исследования распределения скоростей потока при его взаимодействии с моделями трубопроводных переходов были проведены в лаборатории гидравлики и гидромеханики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ). В качестве основной экспериментальной установки использовался лабораторный гидравлический канал с регулируемым уклоном дна и возможностью точного измерения параметров потока.

Полная длина гидравлического канала составляет 15,5 м, ширина рабочего участка – 311 мм, а максимальная глубина воды – до 450 мм. Прозрачная рабочая часть канала длиной 12,5 м позволяла выполнять визуальный контроль структуры течения и проводить измерения скоростей бесконтактным методом с помощью лазерного доплеровского анемометра. Конструкция канала обеспечивает возможность изменения уклона дна от 0,5 до 2,5 %. Поток воды создавался с помощью центробежного насоса, поступал через напорную трубу и расходомер в рабочую часть установки (рисунок 1).

Для изучения влияния взаимного расположения трубопроводов на структуру течения были выполнены измерения скоростей вдоль центральной оси потока, обтекающей модель трубопроводного перехода. Модели трубопроводов были изготовлены из пластика, диаметр моделей трубопроводов составлял 25 мм, для создания шероховатости поверхность моделей была оклеена наждачной бумагой № 100, таким образом, эквива-

¹Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов: НД № 2-020301-001: утв. 21.03.08 / Рос. мор. рег. судоходства. СПб., 2008. 164 с. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?d=0801B481-0D89-4C6C-8E4C-A5C10FD76B6F&f=2-020301-001&type=rules3> (дата обращения: 25.01.2026).

лентная шероховатость составила 100 мкм. Экспериментальные замеры проводились в трех горизонтальных сечениях, расположенных на разных уровнях по высоте, что позволило оценить распределение скоростей в придонной зоне, в межтрубном пространстве и над трубами:

- верхнее сечение – на 2 мм выше верхней точки поверхности моделей трубопроводов;
- среднее сечение – на уровне центров трубопроводов;
- придонное сечение – на 2 мм выше уровня дна канала.

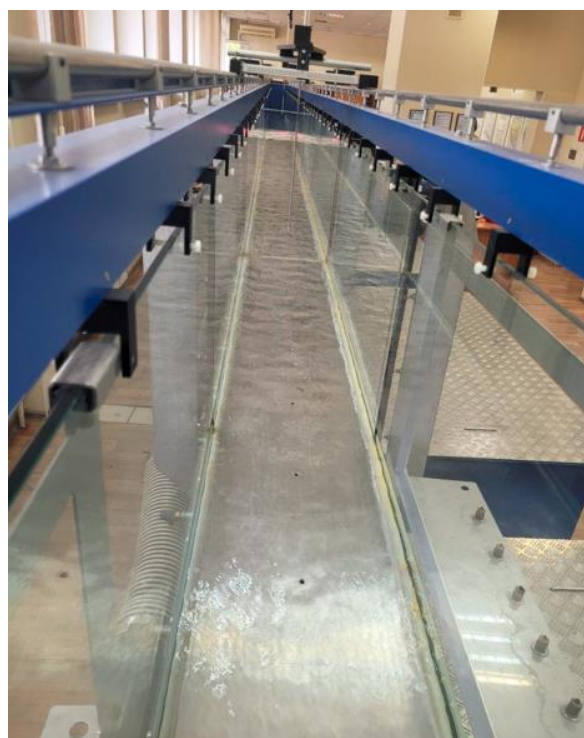


Рисунок 1 – Лабораторный гидравлический канал (автор фото Д. Ю. Шерстнев)
Figure 1 – Laboratory hydraulic channel (photo by D. Yu. Sherstnev)

В каждом сечении замеры проводились через каждые 5 мм вдоль направления потока. Общее число точек в одном сечении составляло 15, что обеспечивало детальное наблюдение изменения скорости по длине. Таким образом, совокупно было выполнено 45 измерений в трех слоях потока.

На рисунке 2 желтыми маркерами показано положение точек измерения скорости.

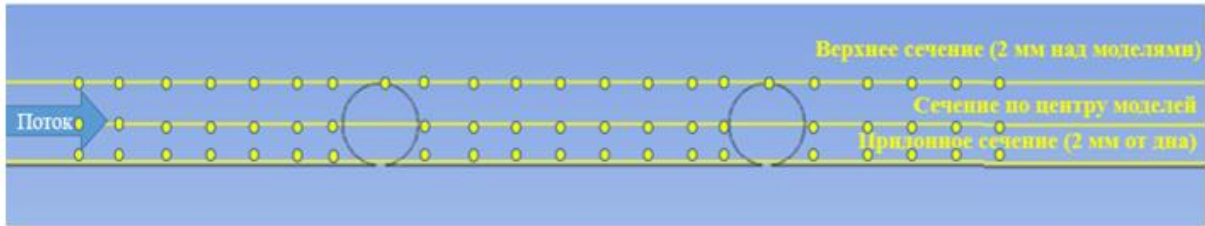


Рисунок 2 – Схема сечений измерения скоростей
Figure 2 – Diagram of velocity measurement cross-sections

Для численного анализа полей скоростей и напряжений было выполнено моделирование в программной среде ANSYS Fluent. Разработанная математическая модель прошла верификацию на основе данных, полученных в ходе физического эксперимента, что позволило обеспечить достоверность численных результатов и корректное воспроизведение основных гидродинамических процессов. При проведении верификации математической модели использовались данные физического эксперимента в гидравлическом канале: скорость потока $V = 0,26$ м/с, глубина $h = 0,075$ м, уклон $i = 0,001$, что обеспечило корректную сопоставимость численных и экспериментальных данных и подтвердило достоверность модели.

Геометрия расчетной области соответствовала реальным размерам лабораторного гидравлического лотка и включала две параллельно расположенные трубы, размещенные на дне канала. Численное моделирование выполнялось для четырех вариантов межтрубного расстояния: $1D$, $2D$, $3D$ и $4D$, что позволило исследовать влияние малых расстояний на структуру течения и взаимодействие трубопроводов.

Регистрируемые величины, включая поля скоростей и распределение давления, снимались в тех же характерных сечениях и точках, что и при проведении физического эксперимента. Такой подход обеспечил корректную сопоставимость численных и экспериментальных данных и позволил выполнить верификацию модели по нескольким критериям.

Для дискретизации расчетной области применялась тетраэдральная сетка с локальным сгущением в зоне поверхностей труб, дна канала и сво-

бодной поверхности (рисунок 3). Увеличенная плотность сетки в приграничных областях обеспечивала высокое качество разрешения тонких структур потока. Для оценки корректности описания пограничного слоя контролировались значения пристеночной функции Y^+ . Во всех выполненных расчетах Y^+ находился в пределах $Y^+ < 1$, что подтверждает соответствие требованиям к высокоточным моделям течения в приграничном слое и корректность численного решения в областях с резкими градиентами скоростей (рисунок 4) [10, 11].

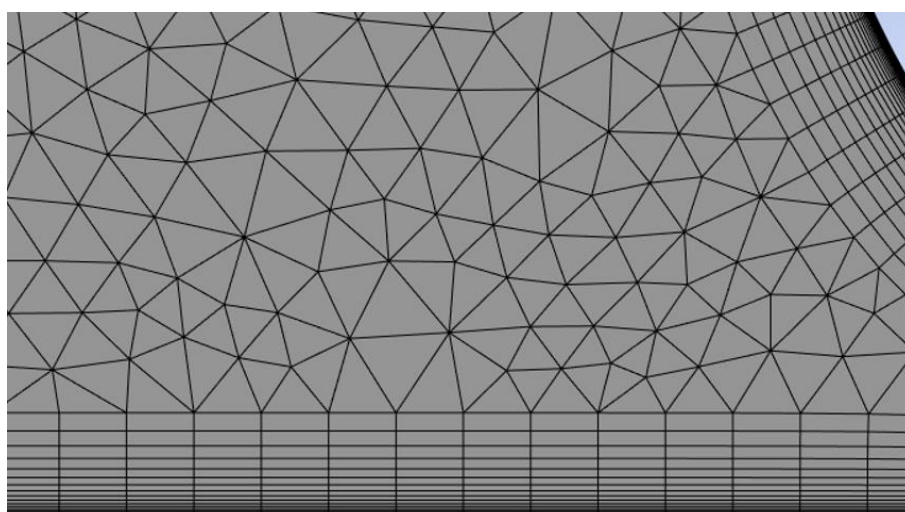


Рисунок 3 – Фрагмент сетки конечных элементов, общий вид
Figure 3 – Fragment of the finite element mesh, general view

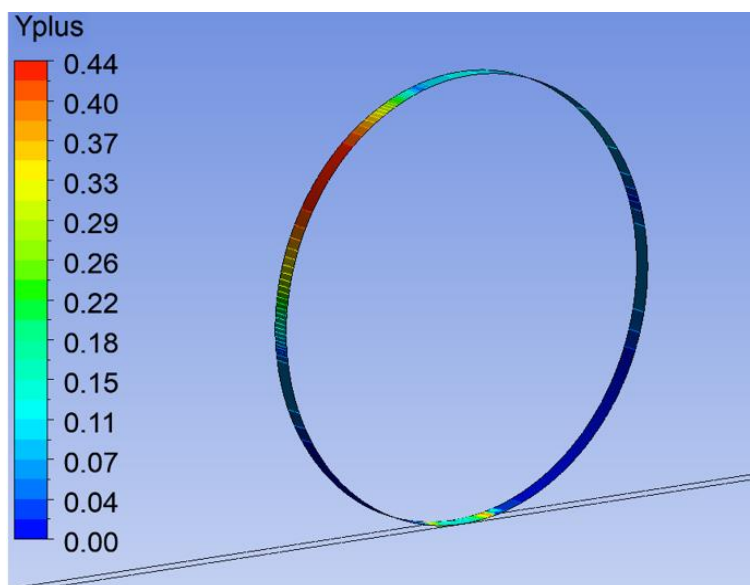


Рисунок 4 – Пристеночная функция Y^+
Figure 4 – Wall function Y^+

В качестве граничных условий в численной модели были заданы параметры, соответствующие условиям физического эксперимента. На входе в расчетную область задавалась постоянная скорость набегающего потока, равная 3 м/с, что обеспечивало воспроизведение реальных гидродинамических условий канала. На выходе устанавливалось нулевое избыточное давление.

Для свободной поверхности учитывалось взаимодействие воды с атмосферным воздухом с применением двухфазной модели Volume of Fluid (VOF), позволяющей отслеживать перемещение границы раздела фаз и корректно моделировать влияние свободной поверхности на структуру течения.

В качестве рабочих сред в расчетах использовались вода и воздух. Их физические свойства принимались постоянными и соответствовали табличным значениям, представленным в таблице 1 [12, 13].

Таблица 1 – Физические свойства сред, используемых при проведении численного моделирования

Table 1 – The environmental physical properties used in numerical simulations

Наименование вещества	Плотность, кг/м ³	Коэффициент динамической вязкости, Па·с
Вода	998,6	0,001003
Воздух	1,225	$1,7894 \cdot 10^{-5}$

Результаты и обсуждение. В программном комплексе ANSYS Fluent реализован широкий набор моделей турбулентности, предназначенных для расчета течений различной степени сложности. В рамках настоящего исследования были рассмотрены и протестированы следующие модели: SST (Shear Stress Transport), SA (Spalart – Allmaras), SSG (Speziale – Sarkar – Gatski RSM) и $k - \epsilon$. Каждая из них имеет свои особенности и область применения. Так, модели семейства $k - \epsilon$ традиционно применяются при расчете развитых турбулентных течений [14], модель SSG RSM – при наличии значительных анизотропий и сильных вихревых структур [15],

модель SST демонстрирует хорошую согласованность с экспериментальными данными при расчете переходных и разделяющихся течений [16].

Для моделирования течения и оценки распределения скоростей в зоне трубопроводного перехода особое внимание было уделено выбору модели турбулентности. Из множества доступных моделей наилучшие результаты по точности воспроизведения экспериментальных данных показала модель SST (Shear Stress Transport). Данная модель эффективно сочетает преимущества моделей $k - \omega$ (недалеко от твердых поверхностей) и $k - \varepsilon$ (в области основного течения), что позволяет достоверно описывать сложные зоны течения с отрывами, закручиванием и сдвиговыми напряжениями, характерными для обтекания труб, расположенных на дне канала. Результаты численного моделирования с использованием модели SST показали хорошее согласование с экспериментальными данными, особенно в области между трубами и в зоне их верхней образующей. Это подтверждает возможность ее применения при дальнейшем численном анализе аналогичных гидродинамических задач.

Дополнительно для корректного описания взаимодействия воды и воздуха в области свободной поверхности применялась модель Volume of Fluid (VOF). Она позволяет отслеживать границу раздела фаз за счет решения уравнения неразрывности для каждой фазы, в частности:

$$\frac{1}{\rho_q} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq}, \quad (1)$$

где ρ_q – плотность q -й фазы, кг/м³;

α_q – объемная доля q -й фазы;

\vec{v}_q – скорость q -й фазы, м/с;

S_{α_q} – внешний массовый источник q -й фазы, кг/(м³·с);

n – число фаз;

\dot{m}_{pq} – массовый обмен между фазами p и q , кг/(м³·с).

Модель VOF обеспечивает точную передачу информации о местоположении границы между жидкостью и газом в каждом контрольном объеме. Это особенно важно в задачах, где свободная поверхность влияет на динамику потока, как, например, при обтекании труб, расположенных на дне канала [12].

Уравнение движения (импульса) для смеси с переменными плотностью и вязкостью также решается с учетом влияния всех фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla\vec{v} + \vec{v}^t)] + \rho\vec{g} + \vec{F}, \quad (2)$$

где ρ – плотность смеси, кг/м³;

\vec{v} – вектор скорости, м/с;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

$\nabla\vec{v}$ – тензор градиента скорости, с⁻¹;

t – время, с;

\vec{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с²;

\vec{F} – внешние объемные силы, Н/м³.

Плотность и вязкость в расчетах определялись как функции объемных долей фаз, что позволило корректно учитывать изменение свойств среды при переходе от воды к воздуху. Такой подход повышает точность моделирования процессов в зоне свободной поверхности, где распределение плотности и вязкости значительно влияет на структуру течения [17–19].

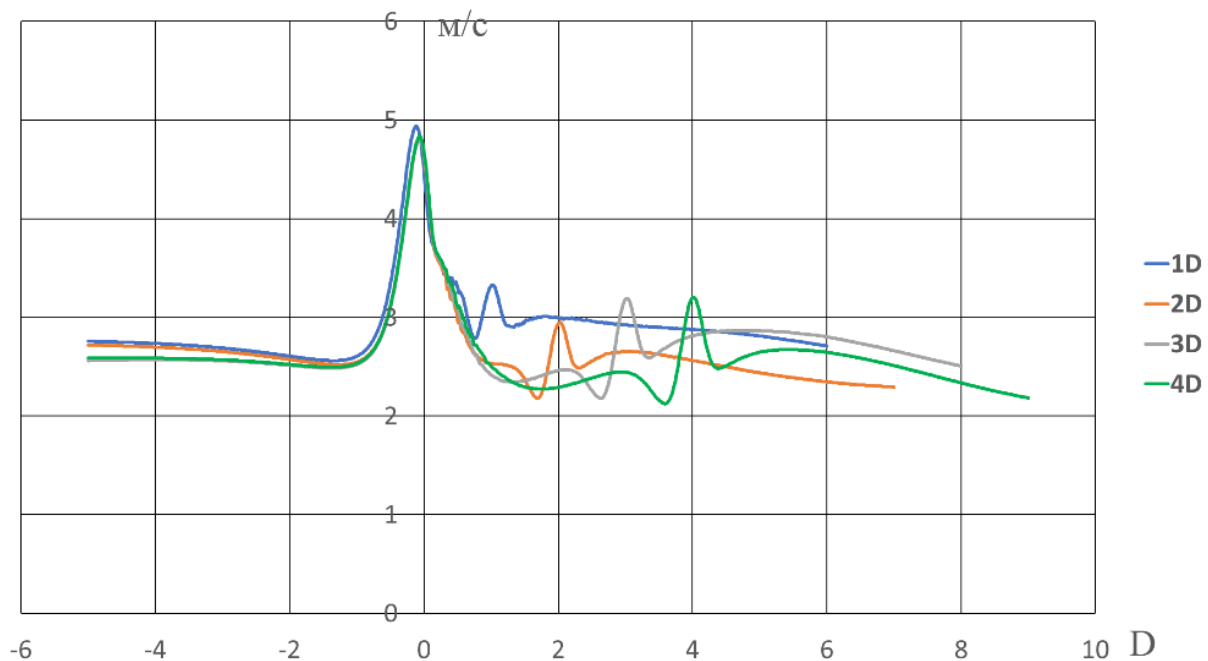
После верификации модели по данным лабораторного эксперимента основные расчеты выполнялись для условий, максимально приближенных к соответствующим натурным параметрам подводного трубопроводного перехода. В соответствии с критерием подобия Фруда, отражающим соотношение инерционных и гравитационных сил в потоке со свободной поверхностью, две нитки подводного трубопроводного перехода размеща-

лись на дне руслового потока под углом 90° к направлению течения. В расчетах использовались следующие параметры: скорость набегающего потока – 3 м/с, глубина водотока – 5 м. Поверхности дна и трубопроводов принимались гладкими.

Для оценки влияния расстояния между трубопроводами на структуру течения были рассмотрены четыре варианта межтрубного расстояния: $1D$, $2D$, $3D$ и $4D$, где D – наружный диаметр трубопровода. Такой выбор расстояний позволил исследовать режимы тесного гидродинамического взаимодействия труб и определить границу перехода к независимому обтеканию.

Расчет полей скоростей и давления проводился в трех характерных сечениях:

- на высоте 20 мм над трубопроводами (рисунок 5);
- на уровне, соответствующем оси трубопроводов (рисунок 6);
- в придонной зоне, на высоте 10 мм от дна канала (рисунок 7).



**Рисунок 5 – Продольная скорость потока
(20 мм над трубопроводами)**

**Figure 5 – Longitudinal flow velocity
(20 mm above pipelines)**

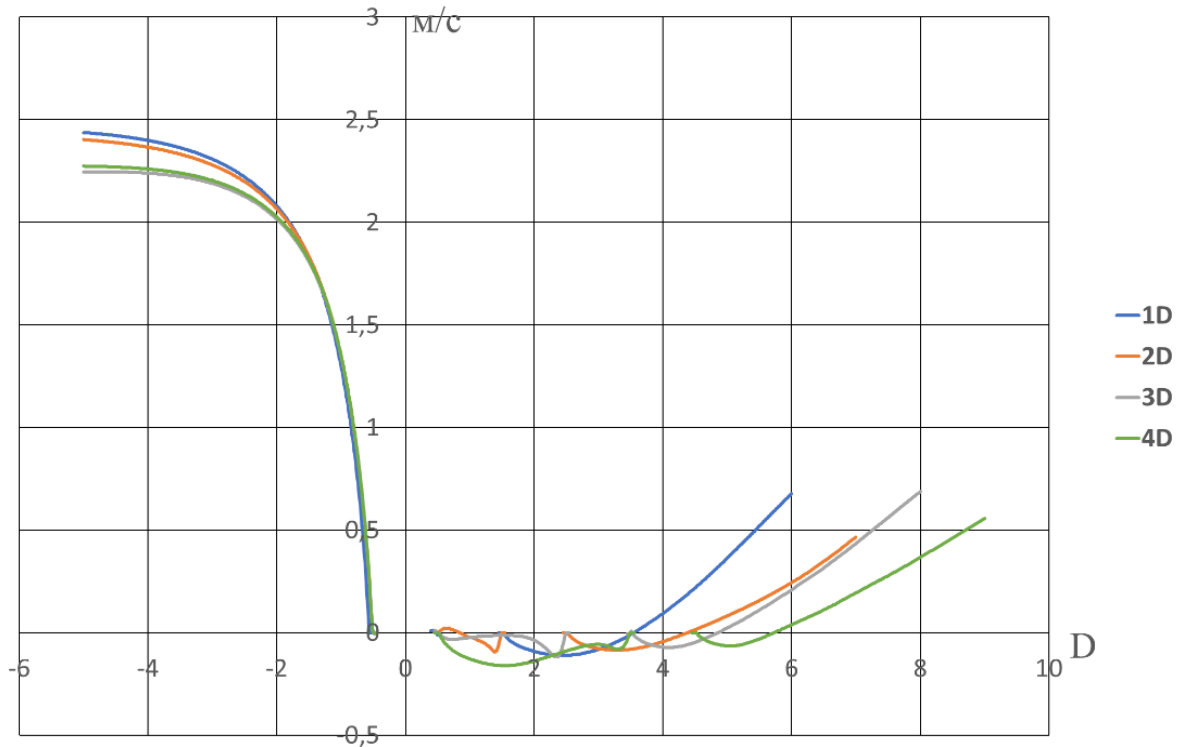


Рисунок 6 – Распределение скорости в межтрубном пространстве на уровне центра сечения трубопроводов

Figure 6 – Velocity distribution in the interpipe space at the level of the center of the pipeline cross-section

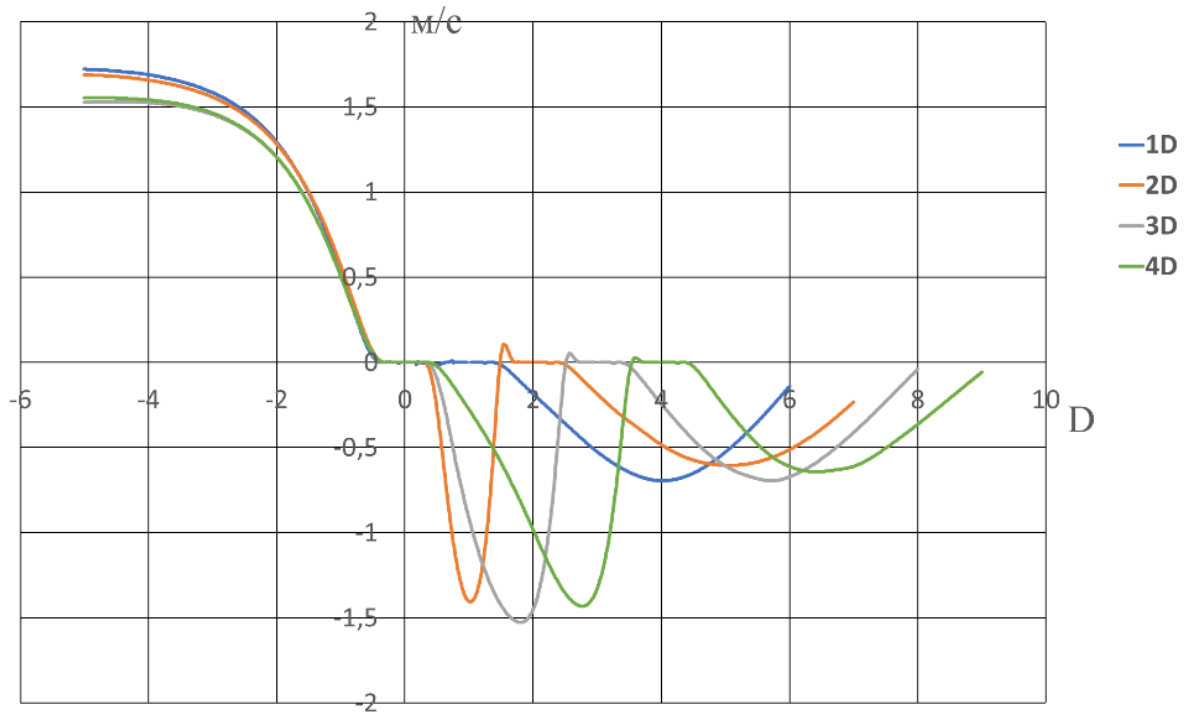


Рисунок 7 – Распределение скоростей в придонной зоне (10 мм от дна)

Figure 7 – Velocity distribution in the near-bottom zone (10 mm from the bottom)

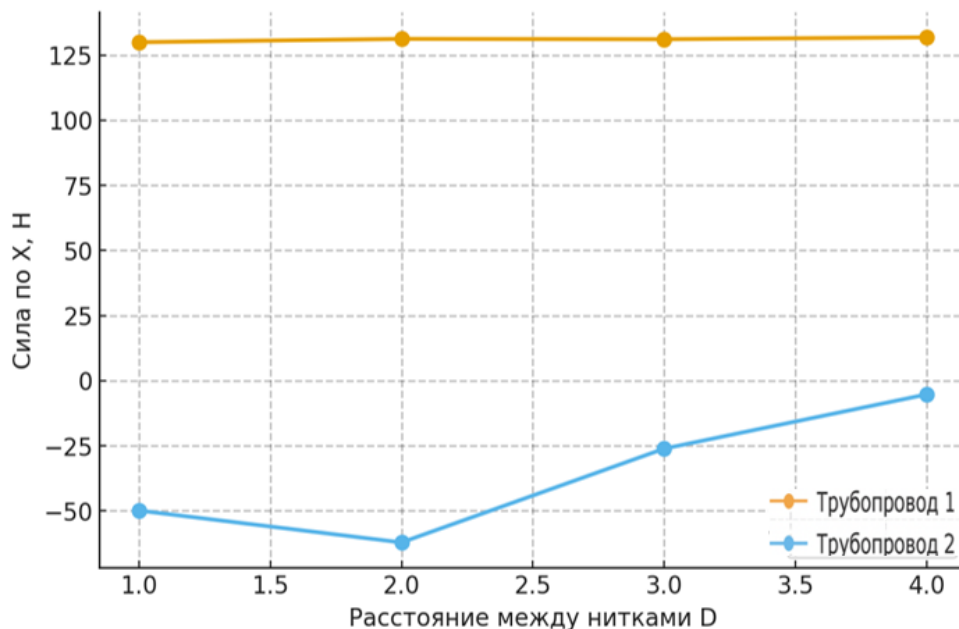
Результаты моделирования показали, что при малых расстояниях между трубопроводами – $1D$ и $2D$ – в межтрубном пространстве формируются выраженные зоны рециркуляции. Эти вихревые структуры полностью или частично экранируют вторую трубу от основного потока, приводя к снижению динамического напора и появлению отрицательной продольной силы сопротивления. В таких условиях вторая труба находится в так называемом режиме «тени» первой трубы, что сопровождается уменьшением подъемной силы и выраженной неустойчивостью течения.

При увеличении межтрубного расстояния до $3D$ вихревые образования становятся менее выраженными, однако влияние первой трубы сохраняется. Поток частично восстанавливается к моменту обтекания второй трубы, что приводит к снижению модуля отрицательной продольной силы и росту подъемной составляющей. Данный режим можно охарактеризовать как переходный: воздействие вихревого следа еще заметно, но начинается формирование более устойчивой структуры течения.

При расстоянии $4D$ вихревые зоны практически не распространяются до второй трубы. Вторая нитка обтекается восстановленным потоком, структура течения становится более стабильной, а распределение скоростей – более симметричным. В этих условиях трубопроводы начинают функционировать как два отдельно обтекаемых тела, что подтверждается исчезновением отрицательной продольной силы и увеличением подъемной силы на второй трубе. Несмотря на ослабление взаимного влияния, локальные ускоренные потоки в верхней части сечения все еще могут приводить к некоторому росту подъемной силы, однако ее характер определяется уже не рециркуляцией, а взаимодействием со свободной поверхностью и волновыми эффектами.

Анализ распределения гидродинамических сил, действующих на нитки трубопровода, показывает, что в диапазоне межтрубных расстояний $1D$ – $3D$ обе трубы функционируют как единая гидродинамическая система.

В этом режиме вихревые структуры, формирующиеся за первой трубой, не успевают затухнуть и продолжают оказывать значительное влияние на обтекание второй нитки, что приводит к снижению подъемной силы и появлению отрицательной продольной составляющей сопротивления в зоне второй трубы. При увеличении расстояния до $4D$ фиксируется переход к режиму практически независимого обтекания: влияние вихревого следа первой трубы существенно ослабляется, поля скоростей выравниваются, а продольная сила, действующая на вторую нитку, стремится к нулю. Этот эффект отчетливо проявляется на графиках силы сопротивления (F_x) и подъемной силы (F_y) (рисунки 8, 9).



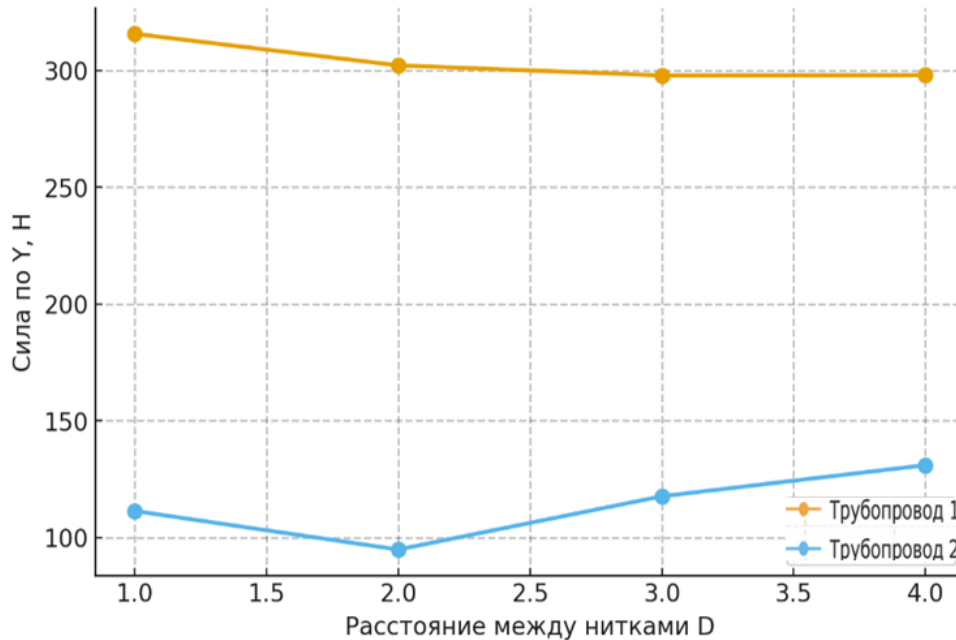
Расстояние между трубопроводами задано в долях диаметра D ($1D = 25$ мм)
The distance between the pipelines specified as a fraction of the diameter D ($1D = 25$ mm)

Рисунок 8 – Зависимость силы сопротивления от межтрубного расстояния

Figure 8 – Dependence of the resistance force on the interpipe distance

Тем не менее при межтрубном расстоянии $4D$ по сравнению с конфигурацией $3D$ для второй нитки трубопровода фиксируется увеличение как продольной силы по оси X , так и подъемной силы по оси Y . Максимальное значение подъемной силы достигается именно при расстоянии $4D$.

Данный эффект обусловлен не влиянием рециркуляции, которая практически исчезает при этом расстоянии, а особенностями волнового взаимодействия набегающего потока.



Расстояние между трубопроводами задано в долях диаметра D ($1D = 25$ мм)

The distance between the pipelines specified as a fraction of the diameter D ($1D = 25$ mm)

Рисунок 9 – Зависимость подъемной силы от межтрубного расстояния
Figure 9 – Dependence of the carrying capacity on the interpipe distance

В условиях восстановления динамического напора после обтекания первой трубы во второй зоне формируется устойчивое течение с выраженными периодическими колебаниями давления и скорости. Эти колебания могут накладываться на остаточные волновые возмущения у свободной поверхности, что приводит к локальному увеличению подъемной силы в зоне второй нитки. Возникающий эффект носит квазирезонансный характер и проявляется при граничных расстояниях, соответствующих переходу от совместного к независимому обтеканию.

При дальнейшем увеличении расстояния между трубами (более $4D$) влияние первой нитки должно полностью исчезать, что должно приводить к постепенному снижению как подъемной, так и продольной силы и формированию устойчивого, симметричного режима обтекания второй трубы.

Выводы. Исследование показало, что изменение межтрубного расстояния существенно влияет на характер гидродинамического взаимодействия параллельных ниток подводного трубопровода. При расстояниях в диапазоне $1D$ – $3D$ вихревые структуры, формирующиеся за первой трубой, сохраняют высокую интенсивность и оказывают прямое воздействие на вторую нитку трубопроводного перехода, приводя к снижению подъемной силы, возникновению отрицательной продольной составляющей сопротивления и формированию единой зоны возмущенного течения. Такой режим характеризуется выраженной неустойчивостью и требует дополнительных мер для обеспечения надежности конструкции.

При увеличении межтрубного расстояния до $4D$ наблюдается переход к режиму практически независимого обтекания: влияние вихревого следа первой нитки значительно ослабляется, динамический напор перед второй трубой частично восстанавливается, что приводит к росту подъемной силы и снижению гидродинамического сопротивления. Для расстояний, близких к $4D$, выявлен эффект кратковременного усиления нагрузок, обусловленный наложением волновых и пульсационных колебаний. Для второй нитки трубопровода при увеличении межтрубного расстояния от $2D$ до $4D$ модуль продольной силы уменьшается с 62 до 5 Н, а подъемная сила возрастает с 95 до 131 Н. Для первой нитки продольная сила остается практически постоянной и близкой к 130 Н, тогда как подъемная сила снижается с 317 до 298 Н.

Таким образом, межтрубное расстояние порядка $4D$ может рассматриваться как оптимальное для обеспечения устойчивого и маловозмущенного обтекания двух параллельных трубопроводов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании подводных переходов и выборе рациональной схемы их пространственного размещения.

Список источников

1. Мордвинцев К. П., Гогин А. Г., Корнеева Е. М. Устойчивость подводного трубопровода при воздействии течения и волн // Инженерные исследования. 2021. Т. 22, № 1. С. 113–121. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121. EDN: TDVELH.
2. Cokgor S., Avci I. Hydrodynamic forces on partly buried tandem, twin pipelines in current // Ocean Engineering. 2001. Vol. 28, № 10. P. 1349–1360. DOI: 10.1016/S0029-8018(00)00051-2.
3. Azamathulla H. M., Zakaria N. A. Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN // Water Science and Technology. 2011. Vol. 63, № 10. P. 2225–2230. DOI: 10.2166/wst.2011.459.
4. Bryanskiy I. A., Borovkov V. S. Velocity distribution along the flow depth in the pipe crossing's area of influence // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 55. P. 26–29. DOI: 10.1007/s10749-021-01314-2. EDN: WWZHNM.
5. Муравьева Л. В. Оценка опасности подводного трубопровода // Транспортные сооружения. 2015. Т. 2, № 4. С. 68–75. EDN: WHWRTR.
6. Numerical simulation of local scour and flow field around pipelines / H. Dong, P. Huang, Z. Sun, Z. Li, L. Chong // Journal of Coastal Research. 2020. Vol. 111, № sp1. P. 272–278. DOI: 10.2112/JCR-SI111-049.1. EDN: FEUTGT.
7. Near-bed flow mechanisms around a circular marine pipeline close to a flat seabed in the subcritical flow regime using a $k-\epsilon$ model / M. C. Ong, T. Utne, L. E. Holmedal, D. Myrhaug, B. Pettersen // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2012. Vol. 134, № 2. Art. 021803. DOI: 10.1115/1.4004631.
8. Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current / B. L. Jensen, B. M. Sumer, H. R. Jensen, J. Fredsøe // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1990. Vol. 112, № 3. P. 206–213. DOI: 10.1115/1.2919858.
9. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007. 528 p.
10. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. 3rd ed. La Cañada, CA: DCW Industries, 2006. 522 p.
11. Schlichting H., Gersten K. Boundary-Layer Theory. 8th ed. Berlin: Springer, 2000. 801 p. DOI: 10.1007/978-3-662-52919-5.
12. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39, № 1. P. 201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
13. White F. M. Fluid Mechanics. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 864 p.
14. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. Vol. 3, № 2. P. 269–289. DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2. EDN: XQOCPG.
15. Gatski T. B., Speziale C. G. On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows // Journal of Fluid Mechanics. 1993. Vol. 254. P. 59–78. DOI: 10.1017/S0022112093002034.
16. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, № 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
17. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // Journal of Computational Physics. 1992. Vol. 100, № 2. P. 335–354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
18. Scardovelli R., Zaleski S. Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow // Annual Review of Fluid Mechanics. 1999. Vol. 31. P. 567–603. DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.567.

19. Ferziger J. H., Perić M. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd ed. Berlin: Springer, 2002. 423 p. DOI: 10.1007/978-3-319-99693-6.

References

1. Mordvintsev K.P., Gogin A.G., Korneeva E.M., 2021. *Ustoychivost' podvodnogo truboprovoda pri vozdeystvii techeniya i voln* [Submarine pipeline stability under currents and waves action]. *Inzhenernye issledovaniya* [Engineering Research], vol. 22, no. 1, pp. 113-121, DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-1-113-121, EDN: TDVELH. (In Russian).
2. Cokgor S., Avci I., 2001. Hydrodynamic forces on partly buried tandem, twin pipelines in current. *Ocean Engineering*, vol. 28, no. 10, pp. 1349-1360, DOI: 10.1016/S0029-8018(00)00051-2.
3. Azamathulla H.M., Zakaria N.A., 2011. Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN. *Water Science and Technology*, vol. 63, no. 10, pp. 2225-2230, DOI: 10.2166/wst.2011.459.
4. Bryanskiy I.A., Borovkov V.S., 2021. Velocity distribution along the flow depth in the pipe crossing's area of influence. *Power Technology and Engineering*, vol. 55, pp. 26-29, DOI: 10.1007/s10749-021-01314-2, EDN: WWZHNM.
5. Muravyova L.V., 2015. *Otsenka opasnosti podvodnogo truboprovoda* [Hazard assessment of undersea pipeline]. *Transportnye sooruzheniya* [Transport Structures], vol. 2, no. 4, pp. 68-75, EDN: WHWRTR. (In Russian).
6. Dong H., Huang P., Sun Z., Li Z., Chong L., 2020. Numerical simulation of local scour and flow field around pipelines. *Journal of Coastal Research*, vol. 111, no. sp1, pp. 272-278, DOI: 10.2112/JCR-SI111-049.1, EDN: FEUTGT.
7. Ong M.C., Utnes T., Holmedal L.E., Myrhaug D., Pettersen B., 2012. Near-bed flow mechanisms around a circular marine pipeline close to a flat seabed in the subcritical flow regime using a k- ϵ model. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 134, no. 2, art. 021803, DOI: 10.1115/1.4004631.
8. Jensen B.L., Sumer B.M., Jensen H.R., Fredsøe J., 1990. Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 112, no. 3, pp. 206-213, DOI: 10.1115/1.2919858.
9. Versteeg H.K., Malalasekera W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow, Pearson Education Limited, 528 p.
10. Wilcox D.C., 2006. *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd ed. La Cañada, CA, DCW Industries, 522 p.
11. Schlichting H., Gersten K., 2000. *Boundary-Layer Theory*. 8th ed. Berlin, Springer, 801 p., DOI: 10.1007/978-3-662-52919-5.
12. Hirt C.W., Nichols B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, vol. 39, no. 1, pp. 201-225, DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
13. White F.M., 2015. *Fluid Mechanics*. 8th ed. New York, McGraw-Hill Education, 864 p.
14. Launder B.E., Spalding D.B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269-289, DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2, EDN: XQOCPG.
15. Gatski T.B., Speziale C.G., 1993. On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 254, pp. 59-78, DOI: 10.1017/S0022112093002034.
16. Menter F.R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, DOI: 10.2514/3.12149.
17. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C., 1992. A continuum method for modeling

surface tension. Journal of Computational Physics, vol. 100, no. 2, pp. 335-354, DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.

18. Scardovelli R., Zaleski S., 1999. Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow. Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 31, pp. 567-603, DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.567.

19. Ferziger J.H., Perić M., 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3rd ed. Berlin, Springer, 423 p., DOI: 10.1007/978-3-319-99693-6.

Информация об авторах

Д. Ю. Шерстнев – аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26), sherstnevdmittii@yandex.ru;

Ю. В. Брянская – профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26), mgsu-hydraulic@yandex.ru, SPIN-код: 6392-7447, ScopusID: 6505953432, ORCID: 0000-0002-6233-3690.

Information about the authors

D. Yu. Sherstnev – Postgraduate Student of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26), sherstnevdmittii@yandex.ru;

Yu. V. Bryanskaya – Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26), mgsu-hydraulic@yandex.ru, SPIN-code: 6392-7447, ScopusID: 6505953432, ORCID: 0000-0002-6233-3690.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.12.2025; одобрена после рецензирования 30.04.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The article was submitted 28.12.2025; approved after reviewing 30.04.2026; accepted for publication 17.06.2026.