

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 532.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.3

Исследование гидродинамического воздействия на неравномерно заглубленный трубопровод в проницаемом дне

Дмитрий Юрьевич Шерстнёв, Юлия Вадимовна Брянская

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании трубопроводных переходов различного назначения решение многих инженерных задач связано с расчетом распределения скоростей и оценкой создаваемых ими гидравлических сопротивлений. Поскольку теоретическим путем оценить величину коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы затруднительно, обычно прибегают к экспериментальным исследованиям. Трубопровод по отношению к потоку может располагаться по-разному, также на практике трубопроводы заглубляют в дно водотока. В физических экспериментах часто моделируется частично заглубленный трубопровод путем усечения заглубленного участка трубопровода. Такая схема экспериментальной установки больше подходит для трубопровода, расположенного в непроницаемом дне. В действительности подверженное эрозии дно бывает пористое и проницаемое.

Материалы и методы. Численно исследованы гидродинамические силы, действующие на трубопровод с неравномерным заглублением с обеих сторон, на проницаемом дне. Для моделирования течения в жидкости применяются двумерные уравнения Навье – Стокса, усредненные по Рейнольдсу с k - ϵ моделью турбулентности. Предполагается, что просачивающийся поток на проницаемом дне подчиняется закону Дарси, уравнение Лапласа решается для расчета порового давления в предположении изотропного и однородного дна. Рассматриваются структура потока и распределение давления вокруг трубопровода. Для численного моделирования использован программный комплекс (ПК) ANSYS Fluent.

Результаты. Установлено, что структура течения вокруг трубопровода асимметрична из-за разницы уровней дна с двух сторон трубопровода. В ПК ANSYS Fluent был смоделирован процесс размыва песчаного дна в зоне размещения трубопровода. Выполнено сравнение результатов расчета при различных расходах. Выявлено, что существует очевидная разница между гидродинамическими силами, испытываемыми трубопроводом, из-за асимметричной структуры потока вокруг трубопровода.

Выводы. Выявлены пиковые значения внешних сил и подъемной силы, уменьшающейся по мере увеличения значения заглубления в дно, за трубопроводом e_2/D . Максимальная погрешность сил сопротивления и подъемной силы, вычисленная с использованием ряда Фурье шестого порядка, составляет около 4 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, обтекание трубопровода, проницаемое дно, неравномерное заглубление трубопровода, подводный трубопровод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шерстнёв Д.Ю., Брянская Ю.В. Исследование гидродинамического воздействия на неравномерно заглубленный трубопровод в проницаемом дне // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 4. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.3

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Шерстнёв, sherstnevdmritii@yandex.ru.

Investigation of hydrodynamic impact on an unevenly buried pipeline in a permeable bottom

Dmitry Yu. Sherstnev, Yuliya V. Bryanskaya

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When designing pipeline crossings for various purposes, the solution of many engineering problems is associated with the calculation of velocity distribution and estimation of hydraulic resistance created by them. Since it is very difficult to estimate the value of hydrodynamic resistance coefficients and lifting force by theoretical means, experimental studies are usually resorted to. Pipelines can be positioned in different ways in relation to the flow, and in practice pipelines are also buried in the bottom of the watercourse. In physical experiments, a partially buried pipeline is often modelled by truncating the buried section of the pipeline. This experimental setup is more suitable for a pipeline located in an impermeable bottom. In reality, erosion-prone bottoms are often porous and permeable.

Materials and methods. Hydrodynamic forces acting on a pipeline with uneven depth on both sides, on a permeable bottom, are numerically studied. Two-dimensional Navier – Stokes equations averaged over Reynolds with k – ϵ turbulence model are used to simulate fluid flow. The seepage flow at the permeable bottom is assumed to obey Darcy's law, the Laplace equation is solved to calculate the pore pressure assuming an isotropic and homogeneous bottom. The flow structure and pressure distribution around the pipeline are considered. The ANSYS Fluent software package is used for numerical modelling.

Results. It was found that the flow structure around the pipeline is asymmetric due to the difference in bottom levels on the two sides of the pipeline. The process of scouring of the sandy bottom in the area of the pipeline location was modelled in ANSYS Fluent. Comparison of calculation results at different flow rates was made. It was found that there is an obvious difference between the hydrodynamic forces experienced by the pipeline due to the asymmetric flow structure around the pipeline.

Conclusions. Peak values of external forces and lift force decreasing as the value of depth into the bottom behind the pipeline increases (e_2/D). The maximum error of the drag and lift forces calculated using sixth order Fourier series is about 4 %.

KEYWORDS: numerical modelling, pipeline flow, permeable bottom, uneven pipeline depth, underwater pipeline

FOR CITATION: Sherstnev D.Yu., Bryanskaya Yu.V. Investigation of hydrodynamic impact on an unevenly buried pipeline in a permeable bottom. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(4):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.3

Corresponding author: Dmitry Yu. Sherstnev, sherstnevdmirii@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка устойчивости трубопроводных переходов через водоемы необходима для выполнения требований эксплуатации трубопроводов и продления срока их службы. Исследование существующих трубопроводов показывает, что большая их часть проложена разными способами. Степень заглубления часто варьируется по маршруту трубопровода, а также по обе стороны трубопровода. Понимание гидродинамических сил на частично заглубленных трубопроводах важно для оценки устойчивости трубопроводов, расположенных на дне водотока [1–5].

В настоящее время проведены исследования гидродинамических сил, действующих на трубопровод, вызванных волнами и течениями [6–21]. В работе [22] выполнена серия испытаний по изучению гидродинамического воздействия на защищенных трубопроводах, взаимодействующих с водным потоком. Эффект укрытия достигался частичным заглублением трубопровода или укладкой трубопровода в открытую траншею. Установлено, что гидродинамические силы, действующие на частично заглубленный трубопровод, значительно уменьшаются с увеличением заглубления в дно. Например, для трубопровода с заглублением 40 % коэффициенты сопротивления и инерции были снижены на 60 %, а коэффициент подъемной силы — на 30 %.

В физических экспериментах часто моделируется частично заглубленный трубопровод путем усечения его заглубленного участка. Например, в труде [22] описана модель трубопровода, которая была помещена на 3,0 мм выше твердого плоского дна, а середина зазора загерметизирована для измерения гидродинамических сил на частично заглубленном трубопроводе. Такая испытательная установка больше подходит для трубопровода, заложеного в непроницаемом дне, а не в проницаемом. В действительности следует учитывать, что дно

пористое и проницаемое. Поровое давление, создаваемое фильтрационным потоком, оказывает существенное гидродинамическое воздействие на трубопровод. Н. Ан и соавт. [23] численно смоделировали гидродинамическое воздействие на трубопровод, частично заглубленный в плоское проницаемое дно, в условиях комбинированного колебательного потока и стационарного течения.

Исследование гидродинамических сил, действующих на трубопровод, рассматривалось путем объединения моделирования фильтрационного потока с моделированием течения над дном. Было обнаружено, что гидродинамические силы уменьшаются с увеличением глубины залегания. Снижение коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной силы оказывается линейным с увеличением глубины залегания [24]. Также определено, что проницаемое дно оказывает значительное влияние на горизонтальную силу, в то время как влияние на подъемную силу незначительно [25].

Исследования, проведенные в отношении гидродинамических сил на частично заглубленном трубопроводе, основаны исключительно на предположении, что уровни дна по обе стороны трубопровода одинаковы. Экспериментальный результат Y.M. Chiew [26] показал, что профили дна с двух сторон частично заглубленного трубопровода могут значительно различаться из-за местного размыва и переноса наносов. Однако гидродинамика частично заглубленного трубопровода с неровной засыпкой с обеих сторон изучена недостаточно.

В данной работе численно исследуются гидродинамические силы, действующие на частично заглубленный трубопровод с неравномерным заглублением по обе стороны трубопровода. На рис. 1 показана схема трубопровода, частично заглубленного в неровное дно. Глубина заглубления трубопровода с двух сторон определяется как e_1 и e_2 соответственно (рис. 1).

Численное моделирование проводилось в программном комплексе (ПК) ANSYS Fluent при раз-

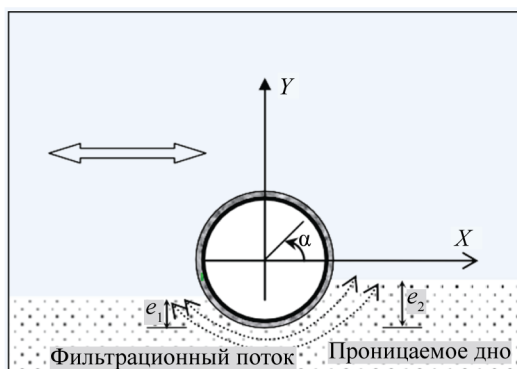


Рис. 1. Схема расположения частично заглубленного трубопровода

личных значениях чисел Рейнольдса: $Re = 2,2 \cdot 10^5$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; $Re = 4 \cdot 10^5$, двух значениях $e_1/D = 0,02$ и $0,5$ и пяти значениях $e_2/D = 0,1$; $0,3$; $0,5$; $0,8$ и $0,98$. При этом исследованы структуры течения, распределение давления и силовые воздействия на трубопровод.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При проведении моделирования было принято расположение системы координат в центре трубопровода, как показано на рис. 1. Положение точки на поверхности трубопровода определяется углом α , который начинается с нулевой точки по оси X и вращается против часовой стрелки [22].

Для моделирования турбулентности использована стандартная k - ϵ модель [27], основанная на уравнениях переноса кинетической энергии

турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ . Расчетная область дискретизируется структурированными 4-узловыми четырехугольными элементами, как показано на рис. 2 ($e_1/D = 0,5$ и $e_2/D = 0,3$). Общее количество узлов расчетной сетки (рис. 2) равно 27 018. Сетка высокой плотности используется вокруг твердых границ обтекаемой поверхности трубопровода для обеспечения точности прогнозирования течения в пограничном слое [28].

Открытая часть поверхности трубы разбита на 200 узлов, а минимальный размер элемента в радиальном направлении рядом с поверхностью трубопровода составляет $0,0001D$. Заглубленная часть поверхности трубы разбита на 100 элементов. Моделирование выполнялось для каждого случая заглубления и числа Рейнольдса. Пример сетки приведен на рис. 2.

Предполагается, что фильтрация жидкости в пористой среде подчиняется закону Дарси. Уравнение Лапласа решается методом конечных элементов для

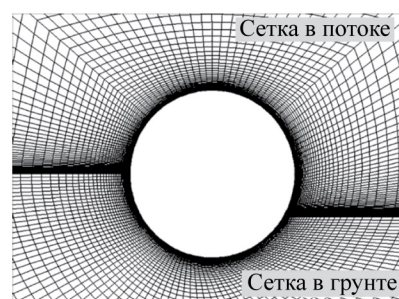


Рис. 2. Пример сетки $e_1/D = 0,5$; $e_2/D = 0,3$

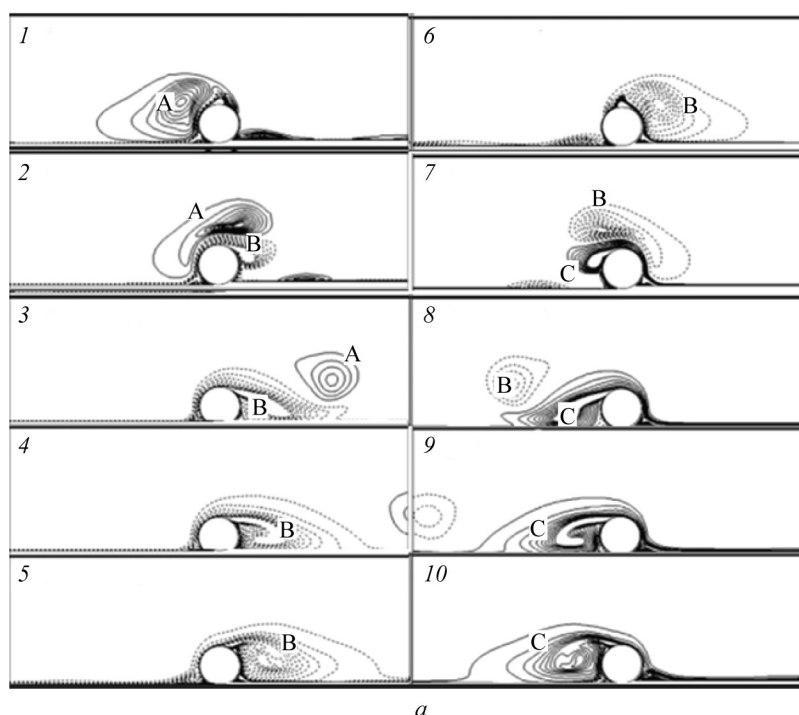


Рис. 3. Структура течения: a — $e_1/D = 0,02$; $e_2/D = 0,1$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; b — $e_1/D = 0,02$; $e_2/D = 0,5$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; c — $e_1/D = 0,02$; $e_2/D = 0,98$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$

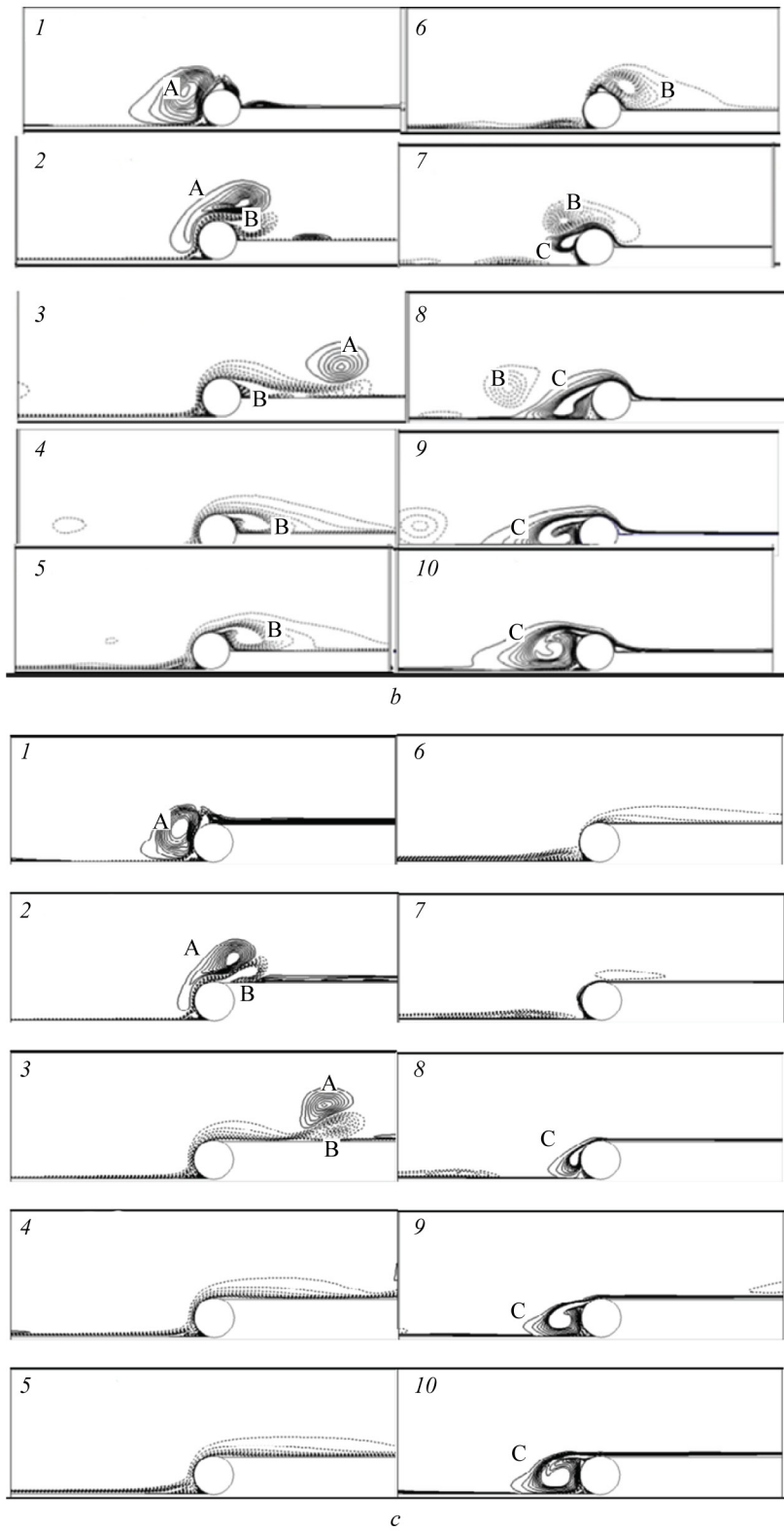


Рис. 3. Структура течения: *a* — $e_1/D = 0,02$; $e_2/D = 0,1$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *b* — $e_1/D = 0,02$; $e_2/D = 0,5$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *c* — $e_1/D = 0,02$; $e_2/D = 0,98$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$ (окончание)

определения порового давления в грунте. Уравнение Лапласа имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0.$$

На каждом шаге расчетного времени поле течения над дном сначала рассчитывалось путем решения двумерных уравнений движения вязкой жидкости Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Взаимодействие фаз учитывается через общее давление и коэффициенты межфазного обмена. Гео-

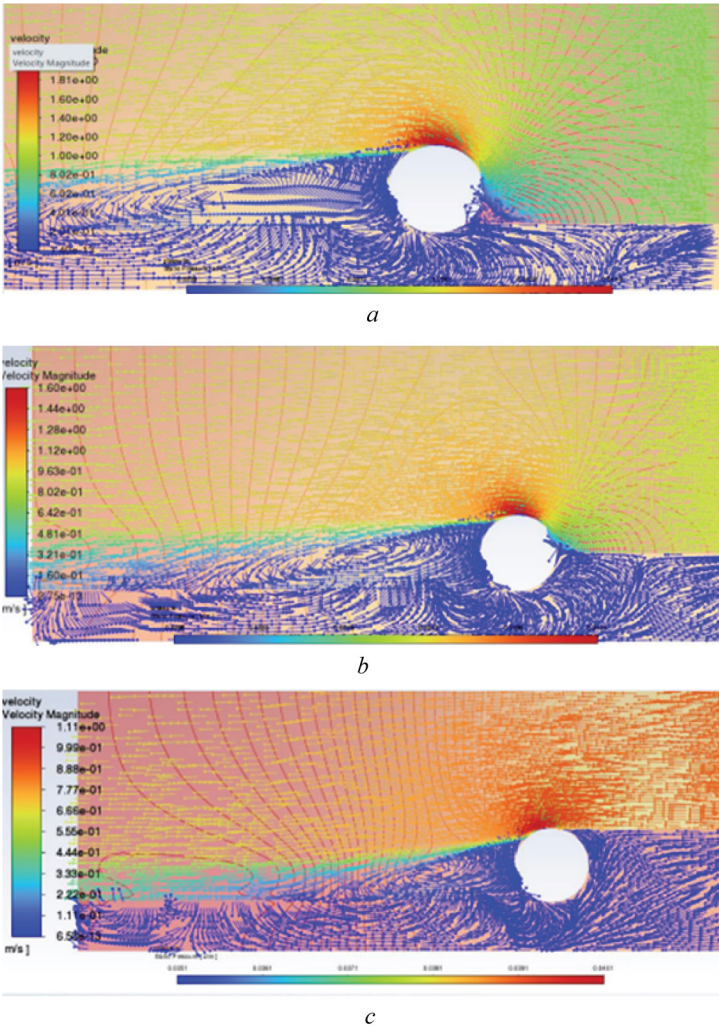


Рис. 4. Распределение давления и скорости потока заглубленного трубопровода при: *a* — $e_2/D = 0,1$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *b* — $e_2/D = 0,5$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *c* — $e_2/D = 0,98$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$

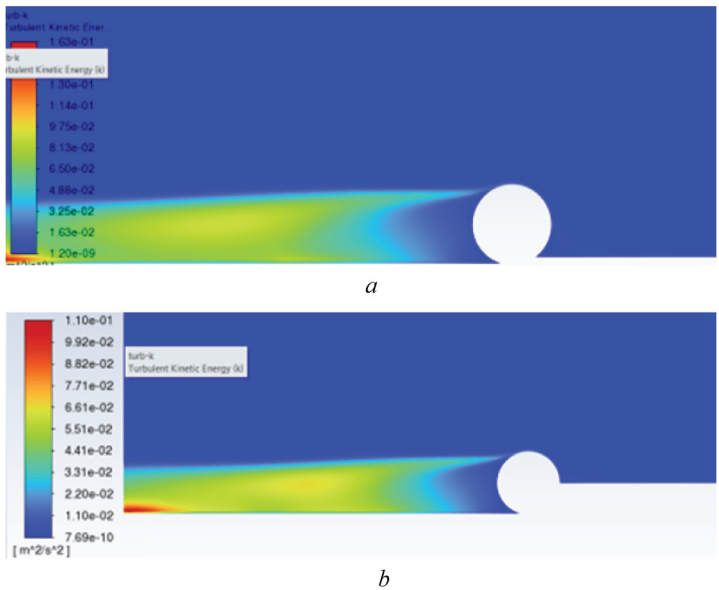


Рис. 5. Распределение турбулентности при: *a* — $e_2/D = 0,1$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *b* — $e_2/D = 0,5$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *c* — $e_2/D = 0,98$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$

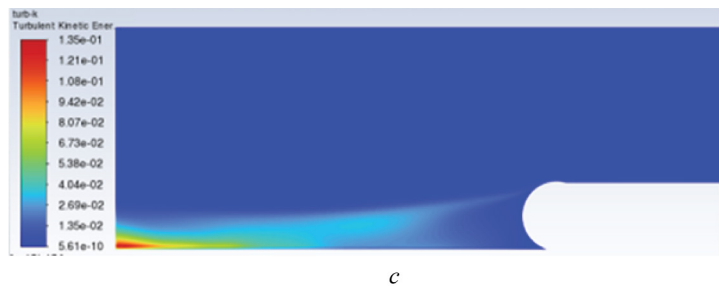


Рис. 5. Распределение турбулентности при: *a* — $e_2/D = 0,1$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *b* — $e_2/D = 0,5$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$; *c* — $e_2/D = 0,98$; $Re = 3,2 \cdot 10^5$ (окончание)

Табл. 1. Коэффициенты гидродинамического сопротивления и подъемной силы, полученные в результате численного моделирования в ПК ANSYS Fluent

Значение	Re = $2,2 \cdot 10^5$		Re = $3,2 \cdot 10^5$		Re = $4 \cdot 10^5$	
e_2/D	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
0,1	0,57	0,7371	0,367	0,5576	0,3069	0,33596
0,5	0,07	0,00324	0,052	0,00246	0,04464	0,00148
0,98	0,01	0,00081	0,008	0,00082	0,00558	0,00074

Табл. 2. Коэффициенты гидродинамического сопротивления и подъемной силы по работе [22]

Значение	Re = $2,2 \cdot 10^5$		Re = $3,2 \cdot 10^5$		Re = $4 \cdot 10^5$	
e_2/D	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
0,1	0,62	0,91	0,39	0,68	0,33	0,454
0,5	0,08	0,004	0,055	0,003	0,048	0,002
0,98	0,01	0,001	0,008	0,001	0,006	0,001

метрическая модель и расчетная сетка построены в ANSYS Workbench с использованием модулей Design Modeler и Meshing.

Гидродинамические силы, действующие на частично заглубленный трубопровод, рассчитываются путем интегрирования распределения давления по поверхности трубопровода и напряжения сдвига на открытой части поверхности. В работе [23] показано, что величина скорости фильтрационного потока на несколько порядков ниже, чем у колебательного течения над дном, поэтому влиянием просачивающегося потока на трубопровод пренебрегают.

При моделировании принято, что расчетная область представляет собой прямоугольный канал длиной 7 м, глубиной 0,12 м и шириной 0,5 м. Цилиндрический трубопровод (диаметром 0,025 см) расположен на песчаном дне. На рис. 3 изображены контуры завихренности течения при $Re = 3,2 \cdot 10^5$; $e_1/D = 0,02$ и $e_2/D = 0,1$; 0,5 и 0,98 соответственно [22]. Положительные вихри (вращающиеся против часовой стрелки) показаны сплошной линией, отрицательные вихри (вращающиеся по часовой стрелке) — пунктирной линией.

Очевидна асимметрия структур течения при различной степени заглубления трубопровода. В дальнейшем при увеличении глубины заглубления вихри, генерируемые с правой стороны трубопровода, становятся меньше.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование реализовано в ПК ANSYS Fluent на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса. Исследование гидродинамических сил, действующих на трубопровод, рассматривалось посредством объединения моделирования фильтрационного потока с моделированием течения над дном [21].

В результате расчетов получено распределение давления и скорости вокруг подводного трубопроводного перехода. Распределение давления и скорости неравномерно заглубленного трубопровода в проницаемом дне показано на рис. 4, 5.

Как видно из представленного графического материала, распределения скорости течения по мере увеличения заглубления трубопровода, вихри, располагающиеся с левой стороны трубопровода, становятся меньше. Также в результате проведенных исследований в ПК ANSYS Fluent получены значения коэффициентов подъемной силы C_L и гидродинамического сопротивления C_D (табл. 1). Результаты расчетов были сопоставлены со значениями аналогичных коэффициентов, выполненных В. Якобсеном [22] (табл. 2).

Результаты численного моделирования подтвердили, что наименьшие значения коэффициента гидродинамического сопротивления и подъемной силы получены для трубопровода с наибольшим

заглублением. Численные результаты сравнения коэффициентов гидродинамического сопротивления, полученные с учетом воздействия фильтрационного потока, хорошо согласуются с данными работы [22], однако значения коэффициента подъемной силы расходятся с данными, указанными в труде [22], величина расхождений достигает 21 %. Данное расхождение можно объяснить учетом фильтрации грунта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование гидродинамического воздействия водного потока на трубопровод рассматривалось путем объединения моделирования фильтрационного потока с моделированием течения над дном. Было обнаружено, что величина гидродинамической силы уменьшается с увеличением заглубления трубопровода. Снижение значений коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъемной

силы оказывается линейно зависящим от величины заглубления трубы. Также определено, что учет воздействия фильтрационного потока оказывает значительное влияние на величину гидродинамического сопротивления, в то время как влияние на значение подъемной силы незначительно. Результаты численного моделирования подтвердили, что наименьшие значения коэффициента гидродинамического сопротивления и подъемной силы получены для трубопровода с наибольшим заглублением. Численные результаты сравнения коэффициентов гидродинамического сопротивления хорошо согласуются с экспериментальными данными В. Якобсена, однако значения подъемной силы, полученные при численном моделировании, расходятся с данными, приведенными в работе [22], в пределах 21 %. Это может свидетельствовать о том, что фильтрация грунта в физических экспериментах имеет существенное значение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дейнеко С.В. Обеспечение надежности систем трубопроводного транспорта нефти и газа. М. : Техника, 2011. 176 с. EDN YWYINZ.
2. Шерстнёв Д.Ю., Брянский И.А., Брянская Ю.В. Взаимодействие водного потока и подводных трубопроводных переходов // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 3. С. 447–454. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.447-454
3. Дебольский В.К. Аварии подводных нефте- и газопроводов и их последствия для водных объектов // Защита населения и территорий при чрезвычайных ситуациях в мирное и военное время как составная часть национальной безопасности России : тез. докл. и выступлений. 1997. С. 234–235. EDN VSSVMT.
4. Хлынцева Е.О. Руслевые деформации в местах подводных переходов магистральных трубопроводов, геодезические методы их определения и прогнозирование для обеспечения экологической безопасности природной среды // Омский научный вестник. 2005. № 2. С.166–169.
5. Дзарданов О.И. Определение степени безопасности подводных переходов газопроводов в сложных инженерно-геологических условиях // Записки горного института. 2008. Т. 178. С. 43–46. EDN LHPWXB.
6. 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. Issue 1. Pp. 26–29. DOI: 10.1007/s10749-021-01314-2
7. Azamathulla H.Md., Zakaria N.A. Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN // Water Science and Technology. 2011. Vol. 63. Issue 1. Pp. 2225–2230. DOI: 10.2166/wst.2011.459
8. Azamathulla H.Md., Yusoff M.A.M., Hasan Z.A. Scour below submerged skewed pipeline // Journal of Hydrology. 2014. Vol. 509. Pp. 615–620. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.058
9. Myrhaug D., Ong M.C., Føien H., Gjengedal C., Leira B.J. Scour below pipelines and around vertical piles due to second-order random waves plus a current // Ocean Engineering. 2009. Vol. 36. Issue 8. Pp. 605–616. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.02.007
10. Sumer B.M., Jensen H.R., Mao Y., Fredsøe J. Effect of lee-wake on scour below pipelines in current // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1988. Vol. 114. Issue 5. Pp. 599–614. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1988)114:5(599)
11. Dey S., Singh N.P. Clear-water scour depth below underwater pipelines // Journal of Hydro-Environment Research. 2007. Vol. 1. Issue 2. Pp. 157–162. DOI: 10.1016/j.jher.2007.07.001
12. Myrhaug D., Ong M.C., Gjengedal C. Scour below marine pipelines in shoaling conditions for random waves // Coastal Engineering. 2008. Vol. 55. Issue 12. Pp. 1219–1223. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.006
13. Zhang Q., Draper S., Cheng L., An H. Effect of limited sediment supply on sedimentation and the onset of tunnel scour below subsea pipelines // Coastal Engineering. 2016. Vol. 116. Pp. 103–117. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.05.010
14. Dong H., Huang P., Sun Z., Li Z., Chong L. See fewer numerical simulation of local scour and flow field around pipelines // Journal of Coastal Research. 2020. Vol. 111. Issue sp1. DOI: 10.2112/JCR-SI111-049.1
15. Damroudi M., Esmaili K., Rajaie S.H. Effect of pipeline external geometry on local scour and self-burial time scales in current // Journal of Applied Fluid

Mechanics. 2021. Vol. 14. Issue 1. DOI: 10.47176/jafm.14.01.31399

16. Zhu Y., Xie L., Su T.-C. Scour protection effects of a geotextile mattress with floating plate on a pipeline // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 8. P. 3482. DOI: 10.3390/SU12083482

17. Sumer B.M., Fredsøe J. Scour below pipelines in waves // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1990. Vol. 116. Issue 3. Pp. 307–323. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1990)116:3(307)

18. Parker M.E., Herbich J.B. Drag and inertia coefficients for partially buried offshore pipelines // All Days. 1978. DOI: 10.4043/3072-ms

19. Кантаржи И.Г., Гогин А.Г. Устойчивость подводного трубопровода при воздействии течения и волн // Гидротехническое строительство. 2021. № 4. С. 28–34. EDN LNOGNA.

20. Боровков В.С., Брянский И.А., Юмашева М.А. Особенности поперечного обтекания водным потоком тел различной формы при наличии экрана // Научное обозрение. 2017. № 6. С. 27–32. EDN ZFCFWF.

21. Дегтярёв В.В., Гармакова М.Е., Шумкова М.Н., Шлычков В.А. Численное моделирование деформаций речных русел при гидротехническом строительстве // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 5 (737). С. 105–117. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-737-5-105-117. EDN CKOKOD.

22. Jacobsen V. Forces on sheltered pipelines // Offshore Technology Conference. 1988. DOI: 10.4043/5851-ms

23. An H., Cheng L., Zhao M. Numerical simulation of a partially buried pipeline in a permeable seabed subject to combined oscillatory flow and steady current // Ocean Engineering. 2011. Vol. 38. Issue 10. Pp. 1225–1236. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.05.010

24. Брянский И.А., Боровков В.С. Гидравлические характеристики турбулентного потока при обтекании препятствий // Гидротехническое строительство. 2020. № 2. С. 37–41. EDN PRQPRE.

25. Neill I.A., Hinwood J.B. Wave and wave-current loading on a bottom-mounted circular cylinder // International Journal of Offshore and Polar Engineering. 1998. Pp. 122–129.

26. Chiew Y.M. Mechanics of local scour around submarine pipelines // Journal of Hydraulic Engineering. 1990. Vol. 116. Issue 4. Pp. 515–529. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1990)116:4(515)

27. Дегтярев В.В., Гармакова М.Е., Федорова Н.Н., Шумкова М.Н., Яненко А.П., Гринь Г.А. Моделирование динамики речного потока и русловые переформирования на участках расположения подводных трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 7 (727). С. 86–97. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-727-7-86-97. EDN ANUTHE.

28. Гармакова М.Е., Дегтярев В.В. Моделирование процесса размыва донного грунта в зоне расположения подводных трубопроводов // Динамика многофазных сред : тез. XVI Всерос. семинара с междунар. участием. 2019. С. 40–41. EDN UMDXRS.

Поступила в редакцию 2 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 5 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Юрьевич Шерстнёв — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1036902; sherstnevdmritii@yandex.ru;

Юлия Вадимовна Брянская — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Assessment of the stability of pipeline crossings of water bodies is often necessary to fulfil the requirements of pipeline operation and to extend the service life of the pipelines. A survey of existing pipelines shows that most of them are laid in a variety of ways. The degree of burial often varies along the pipeline

route as well as on both sides of the pipeline. Understanding the hydrodynamic forces on partially buried pipelines is important for assessing the stability of pipelines located at the bottom of a watercourse [1–5].

The hydrodynamic forces acting on the pipeline caused by waves and currents were studied [6–21]. In [22], a series of tests were carried out to study the hydrodynamic effects on sheltered pipelines interacting

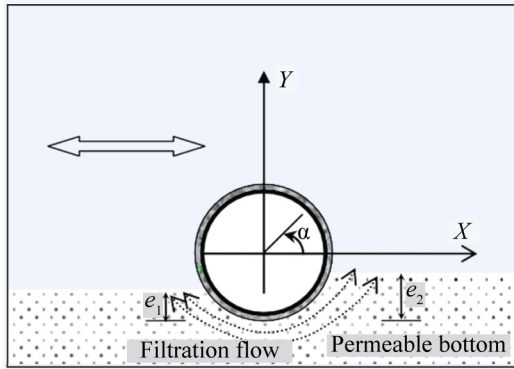


Fig. 1. Diagram of a partially buried pipeline

with water flow. The sheltering effect was achieved by partial burial of the pipeline or by laying the pipeline in an open trench. It was found that the hydrodynamic forces acting on a partially buried pipeline decreased significantly with increasing burial into the bottom. For example, for a pipeline with a burial depth of 40 %, the drag and inertia coefficients were reduced by 60 % and the lift coefficient by 30 %.

In physical experiments, a partially buried pipeline is often modelled by truncating the buried section of the pipeline. For example, in [22], a pipeline model was placed 3.0 mm above a solid flat bottom and the middle of the gap was sealed to measure the hydrodynamic forces on the partially buried pipeline. This test setup is more suitable for a pipeline buried in an impermeable bottom rather than a permeable bottom. In reality, it has to be considered that the bottom is porous and permeable. The pore pressure generated by the seepage flow has a significant hydrodynamic effect on the pipeline [23]. The hydrodynamic effects on a pipeline partially buried in a flat permeable bottom under combined oscillatory

flow and steady-state flow conditions were numerically modelled. The study of the hydrodynamic forces acting on the pipeline was considered by combining seepage flow modelling with over-bottom flow modelling. It was found that the hydrodynamic forces decrease with increasing depth. The decrease in hydrodynamic drag coefficients and lift force is found to be linear with increasing depth [24]. It was also found that the permeable bottom has a significant effect on the horizontal force, while the effect on the lift force is negligible [25].

The studies carried out so far on the hydrodynamic forces on a partially buried pipeline have been based solely on the assumption that the bottom levels on both sides of the pipeline are the same. The experimental result of Chiu [26] showed that the bottom profiles on the two sides of a partially buried pipeline can differ significantly due to local scour and sediment transport. However, the hydrodynamics of a partially buried pipeline with uneven backfill on both sides is not sufficiently studied.

In this paper, the hydrodynamic forces acting on a partially buried pipeline with non-uniform burial on both sides of the pipeline are numerically investigated. Fig. 1 shows a schematic of a pipeline par-

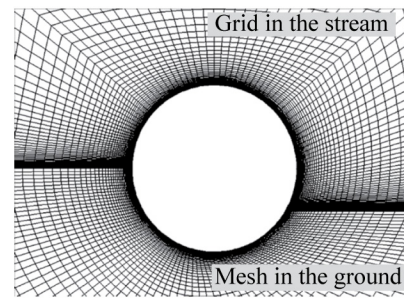


Fig. 2. Mesh example ($e_1/D = 0.5$; $e_2/D = 0.3$)

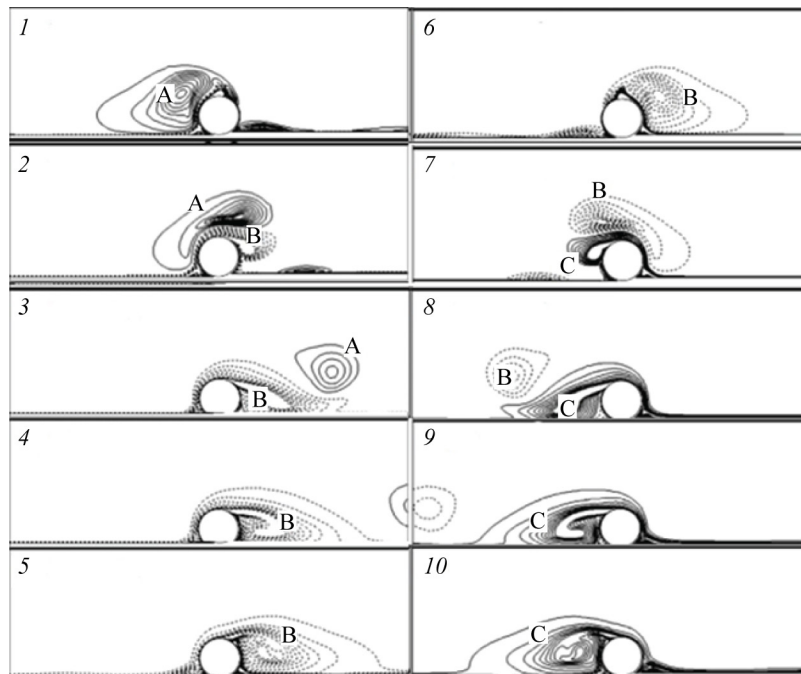


Fig. 3. Flow structure ($e_1/D = 0.02$; $e_2/D = 0.1$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$)

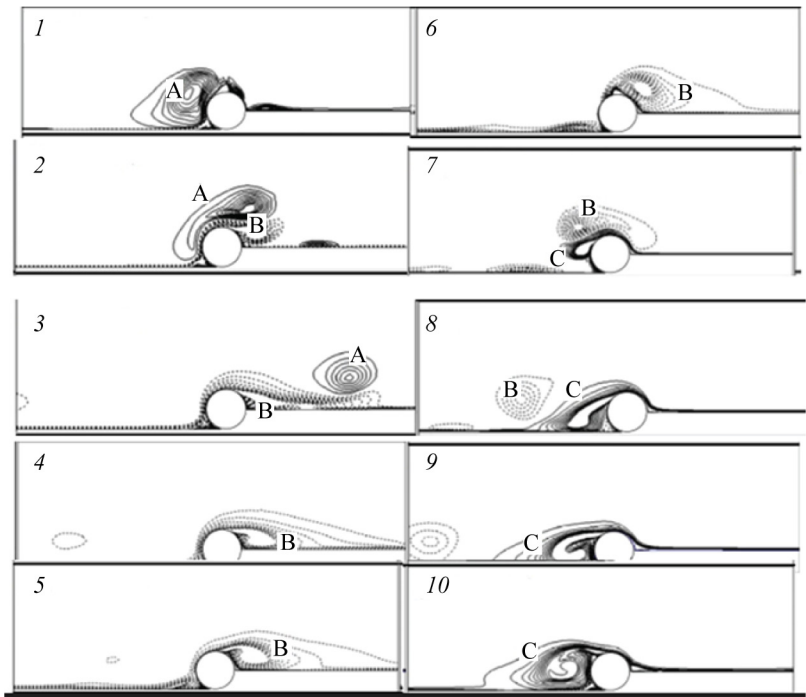


Fig. 4. Flow structure ($e_1/D = 0.02$; $e_2/D = 0.5$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$)

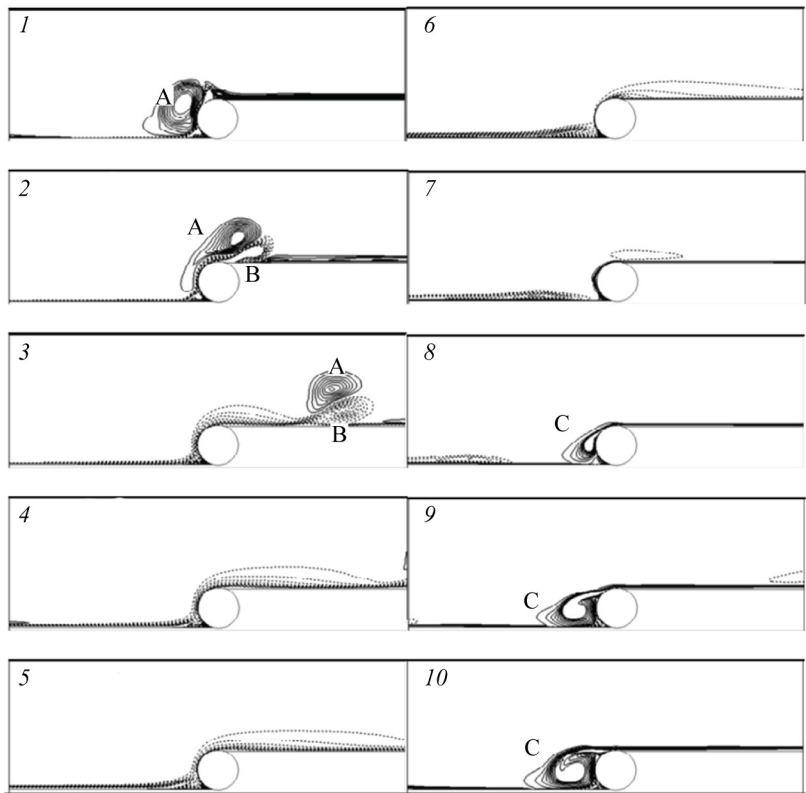


Fig. 5. Flow structure ($e_1/D = 0.02$; $e_2/D = 0.98$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$)

tially buried in an uneven bottom. The depth of burial of the pipeline on both sides is defined as e_1 and e_2 respectively (Fig. 1).

Numerical modelling was carried out in the ANSYS Fluent software package at different values of Reynolds numbers: $Re = 2.2 \cdot 10^5$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$; $Re = 4 \cdot 10^5$, two values of $e_1/D = 0.02$ and 0.5 and five values of $e_2/D = 0.1$;

0.3 ; 0.5 ; 0.8 and 0.98 . The flow structures, pressure distributions and force effects on the pipeline are studied.

MATERIALS AND METHODS

When carrying out the simulation, the location of the coordinate system in the centre of the pipeline was assumed as shown in Fig. 1. The position of a point

on the surface of the pipeline is determined by the angle α , which starts from the zero point on the X axis and rotates anti-clockwise [22].

The standard k – ε model [27], based on the equations of turbulence kinetic energy transfer k and dissipation rate ε , is used for turbulence modelling. The computational domain is discretized by structured 4-node quadrilateral elements as shown in Fig. 2 ($e_1/D = 0.5$ and $e_2/D = 0.3$). The total number of nodes of the computational mesh shown in Fig. 2 is 27,018. The high density mesh is used around the solid boundaries of the streamlined surface of the pipeline to ensure the accuracy of flow prediction in the boundary layer [28].

The open part of the pipe surface is divided into 200 nodes, and the minimum element size in the radial direction near the pipe surface is $0.0001D$. The buried part of the pipe surface is divided into 100 elements. Modelling was performed for each case of burial and Reynolds number. An example of the mesh is shown in Fig. 2.

It is assumed that fluid filtration in porous medium obeys Darcy's law. The Laplace equation is solved by finite element method to determine the pore pressure in the ground. The Laplace equation has the form:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0.$$

At each time step, the flow field above the bottom was first calculated by solving the two-dimensional Navier-Stokes equations of motion of a viscous fluid averaged over Reynolds. Phase interaction is accounted for through total pressure and interphase exchange coefficients. The geometrical model and computational mesh are built in ANSYS Workbench using Design Modeler and Meshing modules.

The hydrodynamic forces acting on a partially buried pipeline are calculated by integrating the pressure distribution over the pipeline surface and the shear stress on the open part of the surface. In [23] it is shown that the velocity of the seepage flow is several orders of magnitude lower than that of the oscillatory flow above the bottom, so the influence of the seepage flow on the pipeline is neglected.

In modelling, it is assumed that the design domain is a rectangular channel 7 m long, 0.12 m deep and 0.5 m wide. The cylindrical pipeline (diameter 0.025 cm) is located on the sandy bottom. Fig. 3–5 show the contours of the flow vorticity at $Re = 3.2 \cdot 10^5$;

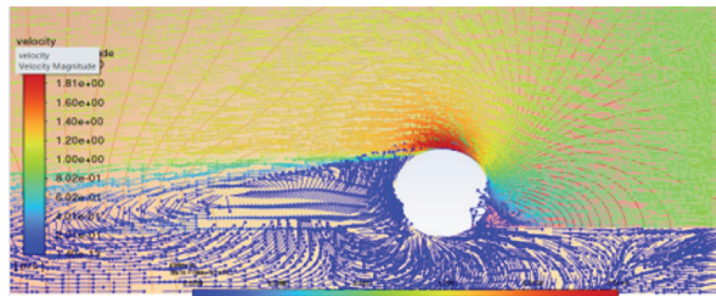


Fig. 6. Pressure and flow velocity distribution of buried pipeline at $e_2/D = 0.1$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$



Fig. 7. Turbulence distribution at $e_2/D = 0.1$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$



Fig. 8. Pressure and flow velocity distribution of buried pipeline at $e_2/D = 0.5$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$



Fig. 9. Turbulence distribution at $e_2/D = 0.5$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$

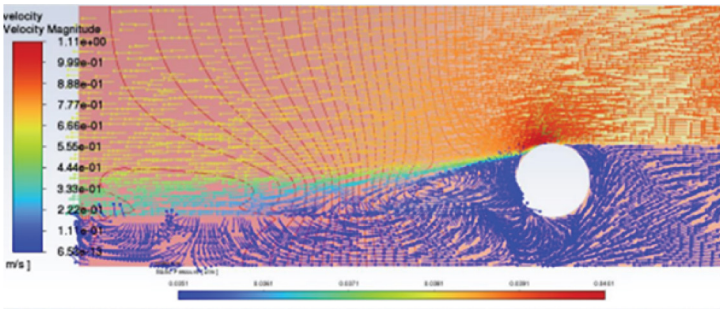


Fig. 10. Pressure and flow velocity distribution of buried pipeline at $e_2/D = 0.98$; $Re = 3.2 \cdot 10^5$



Fig. 11. Turbulence distribution at $e_2/D = 0.98$, $Re = 3.2 \cdot 10^5$

$e_1/D = 0.02$ and $e_2/D = 0.1$; 0.5 and 0.98 , respectively [22]. Positive vortices (rotating anti-clockwise) are shown with a solid line and negative vortices (rotating clockwise) with a dashed line.

The asymmetry of flow structures at different degrees of pipeline burial is evident. In the future, as the depth of burial increases, the vortices generated on the right side of the pipeline become smaller.

RESEARCH RESULTS

Numerical modelling was implemented in ANSYS Fluent software package on the basis of Navier-Stokes equations averaged over Reynolds. The study of hydrodynamic forces acting on the pipeline was considered by combining the modelling of filtration flow with the modelling of flow over the bottom [21].

As a result of the calculations, pressure and velocity distributions around the underwater pipeline crossing were obtained. The pressure and velocity distributions of an unevenly buried pipeline in a permeable bottom are shown in Fig. 6–11.

As can be seen from the presented graphical material, the flow velocity distribution as the pipeline deepening increases, the vortices located on the left side of the pipeline become smaller. In addition, as a result of the conducted research in the ANSYS Fluent software package, the values of the lift force coefficients C_L and hydrodynamic resistance C_D were obtained (Table 1). The calculation results were compared with the values of similar coefficients performed by Jacobson [22] (Table 2).

The results of numerical modelling confirmed that the lowest values of the coefficient of hydrodynamic resistance and lifting force are obtained for the pipeline

Table 1. Coefficients of hydrodynamic drag and lift force obtained as a result of numerical modelling in ANSYS Fluent software package

Value	Re = 2.2 · 10 ⁵		Re = 3.2 · 10 ⁵		Re = 4 · 10 ⁵	
e_2/D	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
0.1	0.57	0.7371	0.367	0.5576	0.3069	0.33596
0.5	0.07	0.00324	0.052	0.00246	0.04464	0.00148
0.98	0.01	0.00081	0.008	0.00082	0.00558	0.00074

Table 2. Coefficients of hydrodynamic resistance and lifting force according to [22]

Value	Re = $2.2 \cdot 10^5$		Re = $3.2 \cdot 10^5$		Re = $4 \cdot 10^5$	
e_z/D	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L
0.1	0.62	0.91	0.39	0.68	0.33	0.454
0.5	0.08	0.004	0.055	0.003	0.048	0.002
0.98	0.01	0.001	0.008	0.001	0.006	0.001

with the highest burial. Numerical results of comparison of the hydrodynamic resistance coefficients, obtained taking into account the effect of filtration flow, are in good agreement with the data [22], but the values of the lifting force coefficient, diverge from the data [22], the value of the discrepancy reaches 21 %. This discrepancy can be explained by taking into account soil filtration.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The study of the hydrodynamic effect of water flow on the pipeline was considered by combining seepage flow modelling with over-bottom flow modelling. It was found that the hydrodynamic force decreases with increasing pipeline burial. The decrease in the values of hydrody-

namic drag coefficients and lift force is found to be linearly dependent on the pipe burial. It is also obtained that taking into account the effect of filtration flow has a significant effect on the value of hydrodynamic resistance, while the effect on the value of lifting force is insignificant. The results of numerical modelling confirmed that the lowest values of hydrodynamic resistance coefficient and lifting force are obtained for the pipeline with the highest pipe burial. The numerical results comparing the hydrodynamic drag coefficients are in good agreement with the experimental data of Jacobsen, but the values of lift force obtained by numerical modelling diverge from the data of [22] within 21 %. This may indicate that ground filtration in physical experiments affects significantly.

REFERENCES

1. Deineko S.V. *Ensuring the reliability of oil and gas pipeline transport systems*. Moscow, Tekhnika, 2011; 176. EDN YWYIHZ. (rus.).
2. Sherstnev D.Yu., Bryansky I.A., Bryanskaya Yu.V. Features of laying underwater pipeline crossings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(3):447-454. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3. 447-454 (rus.).
3. Debolsky V.K. Accidents of underwater oil and gas pipelines and their consequences for water bodies. *Protection of the population and territories in emergency situations in peacetime and wartime as an integral part of Russia's national security : abstracts of reports and speeches*. 1997; 234-235. EDN VSSVMT. (rus.).
4. Khlyntseva E.O. Channel deformations in places of underwater crossings of main pipelines, geodetic methods for their determination and forecasting to ensure the environmental safety of the natural environment. *Omsk Scientific Bulletin*. 2005; 2:166-169. (rus.).
5. Dzardanov O.I. Determining the degree of safety of underwater gas pipeline crossings in difficult engineering and geological conditions. *Journal of Mining Institute*. 2008; 178:43-46. EDN LHPWXB. (rus.).
6. 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; 55(1):26-29. DOI: 10.1007/s10749-021-01314-2
7. Azamathulla H.Md., Zakaria N.A. Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN. *Water Science and Technology*. 2011; 63(1):2225-2230. DOI: 10.2166/wst.2011.459
8. Azamathulla H.Md., Yusoff M.A.M., Hassan Z.A. Scour below submerged skewed pipeline. *Journal of Hydrology*. 2014; 509:615-620. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.058
9. Myrhaug D., Ong M.C., Føien H., Gjengedal C., Leira B.J. Scour below pipelines and around vertical piles due to second-order random waves plus a current. *Ocean Engineering*. 2009; 36(8):605-616. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.02.007
10. Sumer B.M., Jensen H.R., Mao Y., Fredsøe J. Effect of Lee-Wake on Scour Below Pipelines in Current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1988; 114(5):599-614. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1988)114:5(599)
11. Dey S., Singh N.P. Clear-water scour depth below underwater pipelines. *Journal of Hydro-Environment Research*. 2007; 1(2):157-162. DOI: 10.1016/j.jher.2007.07.001
12. Myrhaug D., Ong M.C., Gjengedal C. Scour below marine pipelines in shoaling conditions for random waves. *Coastal Engineering*. 2008; 55(12):1219-1223. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.03.006
13. Zhang Q., Draper S., Cheng L., An H. Effect of limited sediment supply on sedimentation and the onset of tunnel scour below subsea pipelines. *Coastal Engineering*. 2016; 116:103-117. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.05.010

14. Dong H., Huang P., Sun Z., Li Z., Chong L. See fewer Numerical simulation of local scour and flow field around pipelines. *Journal of Coastal Research*. 2020; 111(sp1). DOI: 10.2112/JCR-SI111-049.1
15. Damroudi M., Esmaili K., Rajaie S.H. Effect of Pipeline External Geometry on Local Scour and Self-Burial Time Scales in Current. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2021; 14(1). DOI: 10.47176/jafm.14.01.31399
16. Zhu Y., Xie L., Su T.-C. Scour protection effects of a geotextile mattress with floating plate on a pipeline. *Sustainability*. 2020; 12(8):3482. DOI: 10.3390/SU12083482
17. Sumer B.M., Fredsøe J. Scour below pipelines in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1990; 116(3):307-323. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1990)116:3(307)
18. Parker M.E., Herbich J.B. Drag and inertia coefficients for partially buried offshore pipelines. *All Days*. 1978. DOI: 10.4043/3072-ms
19. Kantardgi I.G., Gogin A.G. Submarine pipeline stability under currents and waves action. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*. 2021; 4:28-34. EDN LNOGNA. (rus.).
20. Borovkov V.S., Bryansky I.A., Yumasheva M.A. Features of water cross-flow of different shaped bodies in presence of a screen. *Scientific Review*. 2017; 6:27-32. EDN ZFCFWF. (rus.).
21. Degtyarev V.V., Garmakova M.E., Shumkova M.N., Shlychkov V.A. Numerical modeling of river-bed deformation for water engineering. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 5(737):105-117. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-737-5-105-117. EDN CKOKOD. (rus.).
22. Jacobsen V. Forces on Sheltered Pipelines. *Offshore Technology Conference*. 1988. DOI: 10.4043/5851-ms
23. An H., Cheng L., Zhao M. Numerical simulation of a partially buried pipeline in a permeable seabed subject to combined oscillatory flow and steady current. *Ocean Engineering*. 2011; 38(10):1225-1236. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.05.010
24. Bryansky I.A., Borovkov V.S. Hydraulic characteristics of the turbulence flow in the pipe crossings. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*. 2020; 2:37-41. EDN PRQPRE. (rus.).
25. Neill I.A., Hinwood J.B. Wave and wave-current loading on a bottom-mounted circular cylinder. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 1998; 122-129.
26. Chiew Y.M. Mechanics of local scour around submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1990; 116(4):515-529. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1990)116:4(515)
27. Degtyarev V.V., Garmakova M.E., Fedorova N.N., Shumkova M.N., Yanenko A.P., Grin' G.A. Modeling the dynamics of the river flow and channel reformation in the areas of underwater pipelines. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019; 7(727):86-97. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-727-7-86-97. EDN AHUTHE. (rus.).
28. Garmakova M.E., Degtyarev V.V. Modeling the process of erosion of bottom soil in the area where underwater pipelines are located. *Dynamics of multi-phase media: abstracts of the XVI All-Russian seminar with international participation*. 2019; 40-41. EDN UMDXRS. (rus.).

Received September 2, 2023.

Adopted in revised form on October 5, 2023.

Approved for publication on October 13, 2023.

B I O N O T E S: **Dmitry Yu. Sherstnev** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1036902; sherstnevdmirii@yandex.ru;

Yuliya V. Bryanskaya — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interest.