

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФРАСТРУКТУРА И ТРАНСПОРТ

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ АПК

*Статья поступила в редакцию: 13.09.2026**Статья принята к публикации: 19.09.2026**Статья опубликована: 28.09.2026*

УДК 626.8:532.57

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23420

Численное моделирование длины полностью сформировавшегося потока при установке устройств дистанционного измерения расхода воды в бетонированных оросительных каналах**Отахонов Мақсуд Юсуфович**

доц., заведующий

лабораторией, ООО Smart Solution System

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: maksud.otakhonov@bk.ru

Зокиров Илхомжон Баҳтиёр угли

докторант, PhD

Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров

иригации и механизации сельского хозяйства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: ilhomjonzokirov1@gmail.com

Бахромова Дилбар Олимжон кизи

докторант, PhD

Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров

иригации и механизации сельского хозяйства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: d.bakhromova@tiiame.uz

Юлдашева Хаётхон Нодиржон кизи

докторант, PhD

Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров

иригации и механизации сельского хозяйства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: kh_yuldosheva@tiiame.uz

Абдурахимова Дурдона Фазлиддин кизи

докторант, PhD

Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров

иригации и механизации сельского хозяйства

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: abdurakhimovadurdona@gmail.com

Арифжанов Алишер Абдуллаевич

самостоятельный соискатель

*Государственное учреждение Национальный метрологический институт Узбекистана**Республика Узбекистан, г. Ташкент**E-mail: alisher@nim.uz***Азизов Хуришд Абдухамидович**

самостоятельный соискатель

*Государственное учреждение Национальный метрологический институт Узбекистана**Республика Узбекистан, г. Ташкент**E-mail: xurshidazizov002@gmail.com***Султонов Рустамжон Субхонали угли**

докторант, PhD

*Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров**ирригации и механизации сельского хозяйства**Республика Узбекистан, г. Ташкент**E-mail: rustamjon94sultonov@gmail.com***Зокиров Исломжон Бахтиёр угли**

магистрант

*Национальный исследовательский университет Ташкентский институт инженеров**ирригации и механизации сельского хозяйства**Республика Узбекистан, г. Ташкент**E-mail: islomjonzokirov10@gmail.com*

Библиографическое описание: Численное моделирование длины полностью сформировавшегося потока при установке устройств дистанционного измерения расхода воды в бетонированных оросительных каналах // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Отахонов М.Ю. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23420>

Numerical modeling of the fully developed flow length for installing remote water discharge measurement devices in concrete-lined irrigation canals

Otakhonov Maqsud Yusufovich

*Head of Laboratory, Smart Solution System LLC, Associate Professor
Uzbekistan, Tashkent*

Zokirov Ilkhomjon Bakhtiyor ugli

Doctoral student

*Department of Hydraulics and Hydroinformatics, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent*

Bakhromova Dilbar Olimjon kizi

Doctoral student

*Department of Hydraulics and Hydroinformatics, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent*

Yuldasheva Hayotkhon Nodirjon kizi

Doctoral student

*Department of Hydraulics and Hydroinformatics, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent*

Abdurakhimova Durdona Fazliddin kizi

Doctoral student

*Department of Hydraulics and Hydroinformatics, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent*

Arifjanov Alisher Abdullayevich

Independent Researcher

*State Institution National Metrology Institute of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent*

Azizov Khurshid Abduxamidovich

Independent Researcher

*State Institution National Metrology Institute of Uzbekistan
Uzbekistan, Tashkent*

Sultonov Rustamjon Subhonali ugli

Doctoral student

*Department of Hydraulics and Hydroinformatics, Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural
Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent*

Zokirov Islomjon Bakhtiyor ugli

*Master's degree student, Department of Hydraulics and Hydroinformatics, Tashkent Institute of
Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University
Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

При размещении радарных и других основанных на измерении скорости потока приборов в оросительных каналах с бетонной облицовкой выбор створа с гидравлически полностью сформировавшимся потоком оказывает непосредственное влияние на точность измерений. В данном исследовании длина участка полного формирования потока в канале ДМ-2 Джизакской системы машинных каналов была оценена на основе трёхмерного численного моделирования. В программном комплексе COMSOL Multiphysics была разработана модель трапецеидального канала длиной 1000 м на основе уравнений RANS и

стандартной k – ϵ модели турбулентности. Глубина воды изменялась в диапазоне 0,30–2,90 м, а число Рейнольдса – от $2,82 \cdot 10^5$ до $6,51 \cdot 10^6$. Профили скорости на центральной вертикали, полученные через каждые 5 м по длине канала, сравнивались с эталонным профилем по критерию NRMS, при этом условие $\text{NRMS} < 1 \%$ было принято в качестве критерия стабилизации потока. По результатам расчётов установлено, что длина участка полного формирования потока составляет 50 – 270 м, а отношение L/H изменяется в пределах 84,1 – 166,7. Между отношением L/H и нормализованным числом Рейнольдса получена логарифмическая зависимость с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9102$. Полученные результаты позволяют предложить практический критерий для выбора гидравлически обоснованного расстояния при определении створа установки радарных систем измерения расхода воды.

Abstract

When installing radar-based and other velocity-based measurement devices in concrete-lined irrigation canals, selecting a cross-section where the flow is hydraulically fully developed has a direct influence on measurement accuracy. In this study, the fully developed flow length in the DM-2 canal of the Jizzakh pumping canal system was evaluated using three-dimensional numerical modelling. A 1000 m long trapezoidal canal model was developed in COMSOL Multiphysics based on the Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations and the standard k – ϵ turbulence model. Water depth was varied from 0.30 to 2.90 m, while the Reynolds number ranged from 2.82×10^5 to 6.51×10^6 . Central vertical velocity profiles extracted at 5 m intervals along the canal were compared with a reference profile using the normalized root mean square (NRMS) criterion, and $\text{NRMS} < 1 \%$ was adopted as the flow stabilization criterion. The results showed that the fully developed flow length ranged from 50 to 270 m, while the corresponding L/H ratio varied between 84.1 and 166.7. A logarithmic relationship was obtained between L/H and the normalized Reynolds number, with a coefficient of determination of $R^2 = 0.9102$. These findings provide a practical criterion for selecting a hydraulically justified installation cross-section for radar-based water discharge measurement systems.

Ключевые слова: канал с бетонной облицовкой, полностью развитый поток, длина формирования потока, COMSOL Multiphysics, RANS, k – ϵ модель, NRMS, число Рейнольдса, радарные измерения.

Keywords: concrete-lined canal, fully developed flow, flow development length, COMSOL Multiphysics, RANS, k – ϵ model, NRMS, Reynolds number, radar measurement.

Введение

Надёжное определение расхода воды в открытых каналах является важным условием эффективного управления водными ресурсами и функционирования автоматизированных систем водоучёта. Точность измерений зависит не только от характеристик оборудования, но и от гидравлического состояния потока в створе наблюдений. После входного участка канала, насосной станции, водозаборного сооружения, изменения поперечного сечения или других локальных возмущений структура потока стабилизируется постепенно. Развитие пограничных слоёв, влияние дна, боковых стенок, свободной поверхности и вторичных

течений вызывают пространственную перестройку поля скоростей [9, 12]. Поэтому измерения, выполненные до достижения устойчивого состояния потока, могут недостаточно точно отражать средние параметры поперечного сечения.

Исследования Nezu и Nakagawa [9], Tominaga et al. [12], а также Kırkgöz и Arıçoğlu [1] сформировали основные представления о турбулентной структуре и развитии профилей скорости в открытых каналах. Однако большинство ранних работ выполнялось в лабораторных каналах с относительно простой геометрией, что ограничивает непосредственное применение полученных зависимостей к крупным оросительным каналам.

Современные исследования уточнили закономерности формирования открытого потока. Das et al. [5] исследовали условия достижения полностью развитого состояния, Mahananda et al. [8] выявили различия турбулентных характеристик развивающегося и полностью развитого потоков, а Zampiron et al. [14] показали, что стабилизация средней скорости и параметров турбулентности может происходить на различных продольных расстояниях. Численные исследования также подтверждают значительное влияние свободной поверхности, геометрии канала и структуры турбулентности на формирование поля скоростей [2, 4, 13, 15]. Следовательно, использование единого фиксированного расстояния для размещения измерительного створа не всегда является гидравлически обоснованным.

Для натуральных бетонных оросительных каналов задача усложняется трапецеидальной формой сечения, большими размерами, высокими числами Рейнольдса и изменяющейся глубиной воды. Проведение полномасштабных экспериментов при различных режимах требует значительных ресурсов, поэтому перспективным является применение численного моделирования на основе уравнений RANS. Модели семейства $k-\epsilon$ широко используются при расчёте турбулентных потоков благодаря их вычислительной устойчивости и способности воспроизводить основные характеристики открытого течения [3, 6, 10].

Несмотря на достигнутые результаты, длина полного формирования потока в крупных бетонных трапецеидальных оросительных каналах применительно к размещению бесконтактных радарных систем измерения расхода остаётся недостаточно изученной. Требуется количественный критерий, позволяющий определить положение створа, начиная с которого изменения профиля скорости становятся несущественными.

Целью настоящего исследования является определение длины полного формирования потока при различных глубинах воды в бетонном трапецеидальном канале ДМ-2 с использованием трёхмерного моделирования в COMSOL Multiphysics, оценка стабилизации профиля скорости по критерию NRMS и разработка практического критерия выбора створа установки бесконтактной радарной системы измерения расхода воды.

Материалы и методы

Гидравлическая характеристика исследуемого участка. В качестве объекта исследования был выбран канал ДМ-2, входящий в систему Джизакских машинных каналов. Данная система предназначена для подъёма воды из реки Сырдарья с помощью насосных станций на более высокие отметки и её последующей подачи на орошаемые земли Джизакского оазиса.

Общая протяжённость канала ДМ-2 составляет 68,5 км, а площадь орошаемых земель, в водообеспечении которых он участвует, достигает приблизительно 53,1 тыс. га. Поскольку эксплуатационный режим канала определяется работой насосных агрегатов, водозаборных сооружений и изменением потребности в воде в течение вегетационного периода, глубина воды и скоростной режим потока изменяются в достаточно широком диапазоне.

Для проведения натурных исследований был выбран створ ПК-50+20, характеризующийся устойчивым направлением потока, бетонным покрытием русла и возможностью одновременного применения нескольких измерительных приборов. Расположение исследуемого участка показано на рис. 1.

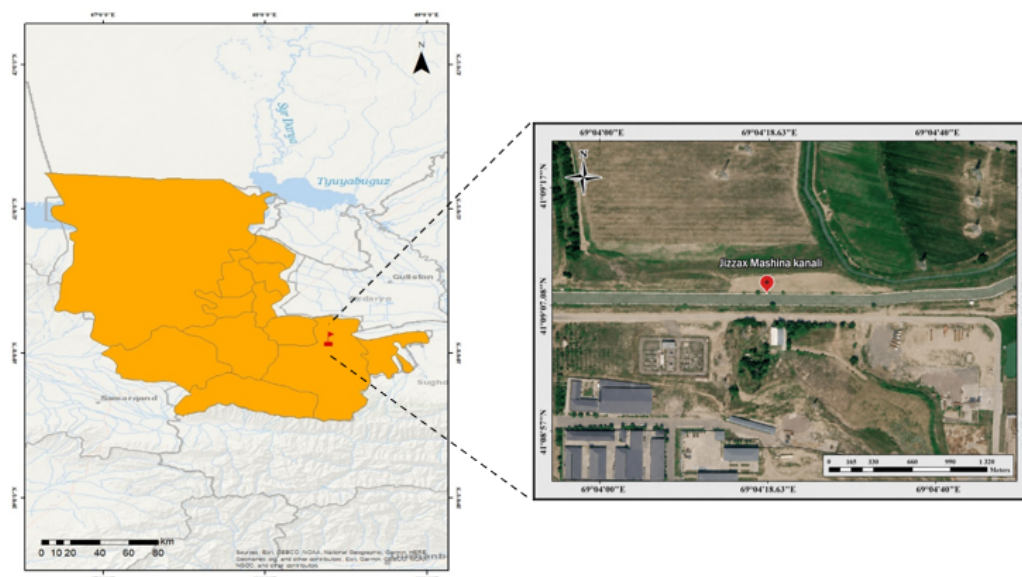


Рисунок 1. Географическое расположение канала ДМ-2 и исследуемого участка

Створ имеет трапециевидальное поперечное сечение. Основные проектные параметры приведены в таблице 1. Указанные характеристики были приняты в качестве исходных данных при построении геометрии численной модели.

Таблица 1.

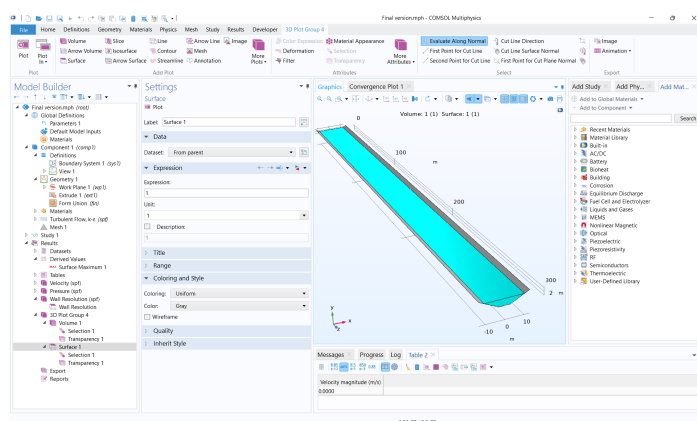
Основные проектные гидравлические параметры канала ДМ-2 в исследуемом створе ПК-50+20

Наименование параметра	Обозначение	Значение	Единица измерения
Измерительный створ	ПК	50+20	—
Расчётный расход воды	Q	36	м ³ /с
Ширина канала по дну	b	5,0	м
Коэффициент заложения откоса	m	2,0	—
Глубина воды	h	3,2	м
Ширина водной поверхности	B	17,8	м
Площадь живого сечения	ω	36,48	м ²
Смоченный периметр	χ	19,31	м
Гидравлический радиус	R	1,89	м
Проектная средняя скорость потока	v	0,985	м/с
Коэффициент шероховатости Маннинга	n	0,017	—

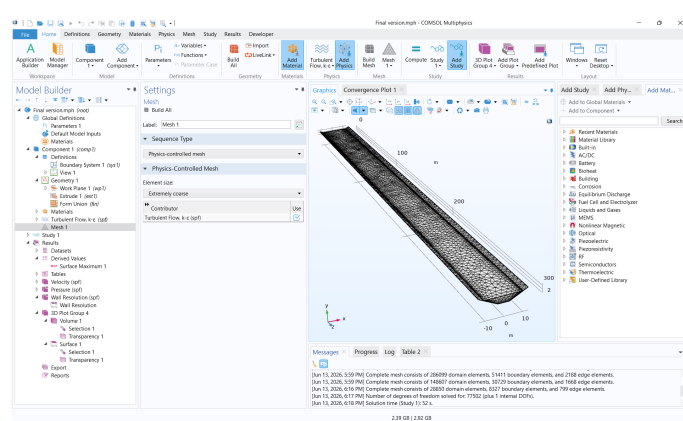
Наименование параметра	Обозначение	Значение	Единица измерения
Продольный уклон дна канала	i	0,00012	—

Трёхмерная гидродинамическая модель. В качестве рабочей среды в модели принималась вода. Поток рассматривался как несжимаемый, трёхмерный, турбулентный и установившийся во времени. Дно и боковые стенки канала задавались как твёрдые недеформируемые поверхности, а влияние силы тяжести на движение потока непосредственно учитывалось в расчётах. Принятые допущения позволили численно воспроизвести установившийся режим течения, характерный для бетонных оросительных каналов в природных условиях.

Геометрия модели была построена на основе реального трапецеидального поперечного сечения канала (рис. 2, а). На входной границе задавалось условие Inlet, на выходной - Outlet; для дна и боковых стенок применялось условие No-slip Wall, а верхняя граница задавалась как свободная поверхность воды. Длина расчётной области составляла 1000 м. Расчёты для различных режимов глубины выполнялись в стационарной постановке с использованием Stationary Study.



а) 3D-геометрия;



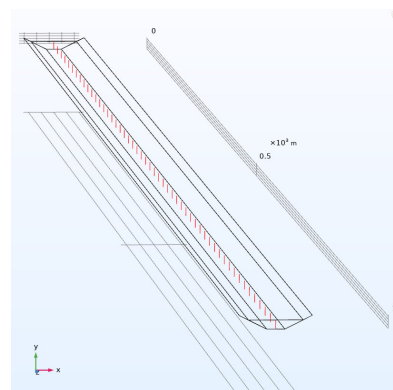
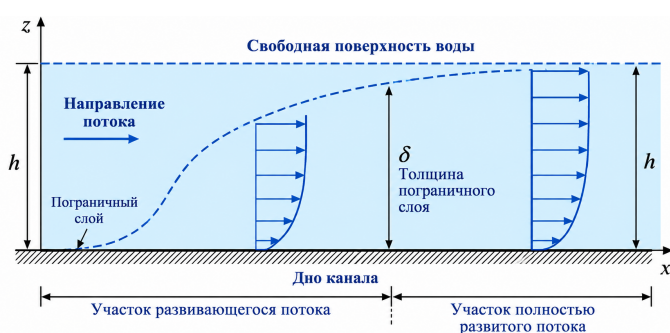
б) сетка конечных элементов;

Рисунок 2. Этапы построения численной модели

Расчётная область была дискретизирована с использованием тетраэдрических элементов. Для более точного описания значительных градиентов скорости вблизи дна и боковых стенок применялись призматические слои. Расчётная сетка модели канала ДМ-2 включала в общей сложности 196 017 объёмных элементов, из которых 134 326 являлись тетраэдрическими, 60 537 – призматическими и 1 571 – пирамидальными. На внешних поверхностях было сформировано 20 512 треугольных элементов (рис. 2, б).

Такая структура расчётной сетки обеспечила оптимальное соотношение между устойчивостью численного решения и вычислительными затратами.

Критерий определения длины полного формирования потока. После входного участка канала толщина пограничного слоя, формирующегося у дна и боковых стенок, постепенно увеличивается по направлению потока (рис. 3, а). Когда пограничный слой охватывает всю глубину потока, форма профиля скорости по центральной вертикали практически стабилизируется. Первое расстояние от входа, на котором достигается такое состояние, принималось за длину полного формирования потока L . В численной модели профили скорости по центральной вертикали определялись в поперечных сечениях, расположенных на расстояниях $x=5, 10, 15, \dots, 1000x = 5, 10, 15, \dots, 1000$ м от входа в расчётную область (рис. 3, б).



а) схема развития пограничного слоя;

б) контрольные вертикали вдоль расчётной модели длиной 1000 м;

Рисунок 3. Формирование потока и расположение контрольных вертикалей

Условие $NRMS < 1 \%$ было принято в качестве критерия практической стабилизации профиля скорости. За длину полного формирования потока L принималось первое расстояние от входа, на котором выполнялось условие $NRMS < 1 \%$ и в последующих расчётных сечениях значения $NRMS$ также сохранялись ниже 1% .

Результаты и обсуждение

Стабилизация профиля скорости по длине канала. Численные расчёты показали, что в сечениях, расположенных вблизи входного участка, профиль скорости существенно изменяется по направлению потока, тогда как по мере продвижения вниз по течению различия между профилями постепенно уменьшаются. На рисунке 4 видно, что центральные вертикальные профили скорости, полученные в различных контрольных сечениях, последовательно сближаются и после определённого расстояния практически совпадают. Данный процесс объясняется развитием пограничных слоёв от дна и боковых стенок и их постепенным распространением на основную область потока, в результате чего формируется устойчивый профиль скорости.

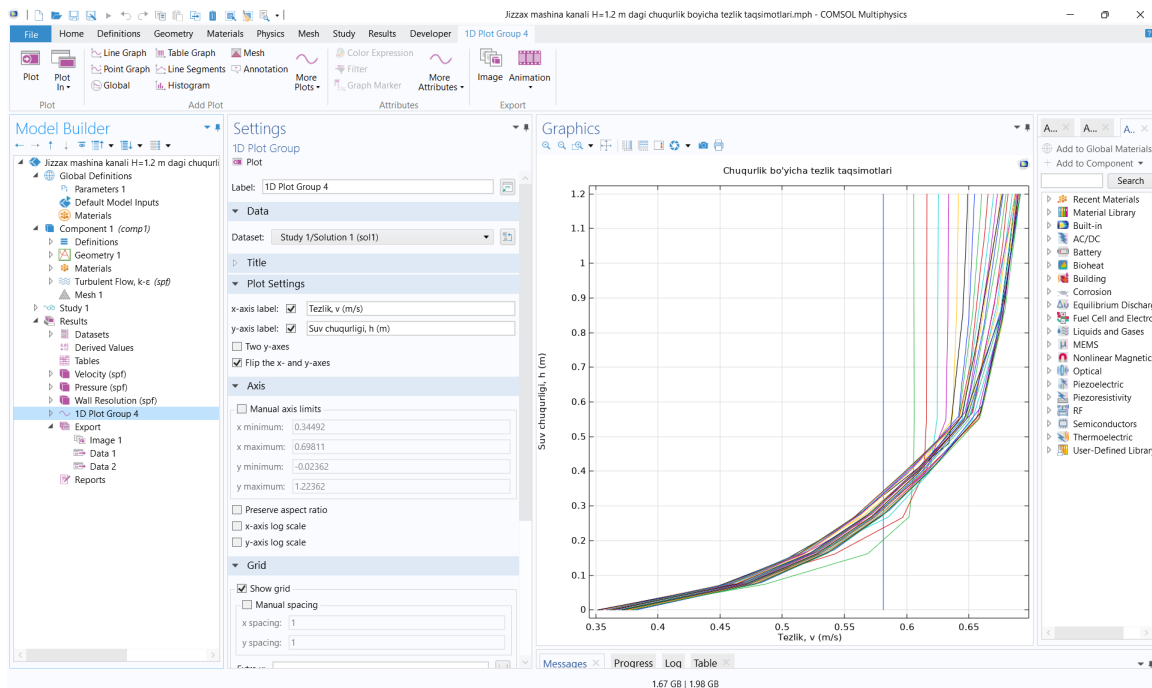


Рисунок 4. Профили скорости по глубине на центральной вертикали канала ДМ-2 при различных режимах течения, полученные в COMSOL Multiphysics

Для режима с глубиной воды $H = 1,20$ м значение NRMS при $x = 5$ м составляло 11,231 % и по мере увеличения расстояния последовательно снижалось. При $x = 145$ м значение NRMS было равно 1,127 %, то есть принятый критерий ещё не выполнялся. При $x = 150$ м NRMS снизилось до 0,949 % и на последующих расчётных сечениях сохранялось ниже 1 %. В связи с этим для данного режима длина полного формирования потока была принята равной $L = 150$ м, а относительная длина составила $L/H = 125$.

Как видно из рисунка 5, на участке после достижения указанного порогового значения NRMS в пределах всей расчётной длины 1000 м преимущественно колеблется в диапазоне 0,1–0,7 %, что подтверждает сохранение устойчивого, полностью сформировавшегося состояния потока.

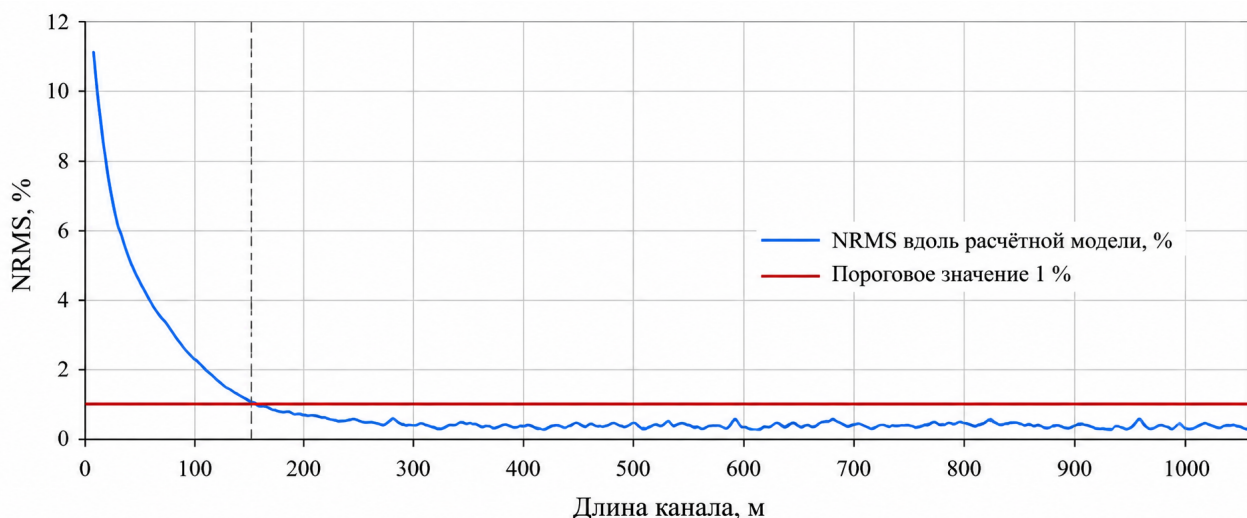


Рисунок 5. Изменение NRMS по длине канала относительно эталонного профиля при глубине $h = 1,20$ м

Хотя Kırkgöz и Ardiçoğlu экспериментально исследовали процесс развития потока в лабораторном канале [1], в настоящем исследовании тот же процесс количественно оценивается для натурной геометрии трапецеидального бетонного оросительного канала при высоких числах Рейнольдса с использованием трёхмерной RANS-модели. Полученные результаты показывают, что применение количественного критерия сходимости профилей скорости является более строгим и воспроизводимым подходом по сравнению с визуальной оценкой потока как “стабилизировавшегося”.

Влияние глубины воды и числа Рейнольдса на длину формирования потока. При увеличении глубины воды от 0,30 до 2,90 м длина полного формирования потока возрастала от 50 до 270 м. Однако относительный показатель L/H изменялся не монотонно. При малых глубинах наблюдались значения порядка 150–167, тогда как с увеличением числа Рейнольдса величина L/H в целом снижалась и при глубинах 2,2–2,8 м составляла приблизительно 84–88. Все расчётные режимы обобщены в таблице 2.

Таблица 2.

Обобщённые результаты численного моделирования для канала ДМ-2

Н, м	R, м	V , м/с	D, м	$Re/10^6$	L, м	L/H
0,3	0,26	0,27	0,27	0,282	50	166,7
0,4	0,34	0,31	0,35	0,431	60	150,0
0,6	0,48	0,40	0,50	0,769	100	166,7
0,8	0,62	0,47	0,64	1,148	110	137,5
1,0	0,74	0,53	0,78	1,557	120	120,0
1,2	0,86	0,58	0,91	1,991	150	125,0
1,4	0,97	0,63	1,03	2,449	165	117,9
1,6	1,08	0,68	1,15	2,927	170	106,2
1,8	1,19	0,72	1,27	3,426	175	97,2
2,0	1,29	0,76	1,38	3,945	180	90,0
2,2	1,39	0,80	1,50	4,482	185	84,1
2,4	1,49	0,84	1,61	5,038	210	87,5
2,6	1,59	0,88	1,72	5,612	225	86,5
2,8	1,69	0,92	1,83	6,204	240	85,7
2,9	1,74	0,93	1,89	6,507	270	93,1

Для установления зависимости между L/H и Re число Рейнольдса было нормализовано относительно 10610^6 . Методом наименьших квадратов была получена следующая логарифмическая зависимость:

Коэффициент детерминации полученной зависимости составил $R^2 = 0,9102$, что свидетельствует о сильной зависимости относительной длины формирования потока от числа Рейнольдса в исследованном диапазоне. Вместе с тем для отдельных режимов с наибольшей глубиной наблюдались отклонения от общего тренда. Это указывает на то, что величину L целесообразно оценивать не только как функцию числа Рейнольдса, но и с учётом геометрических характеристик канала, в частности отношения B/H , коэффициента заложения откосов и влияния боковых стенок.

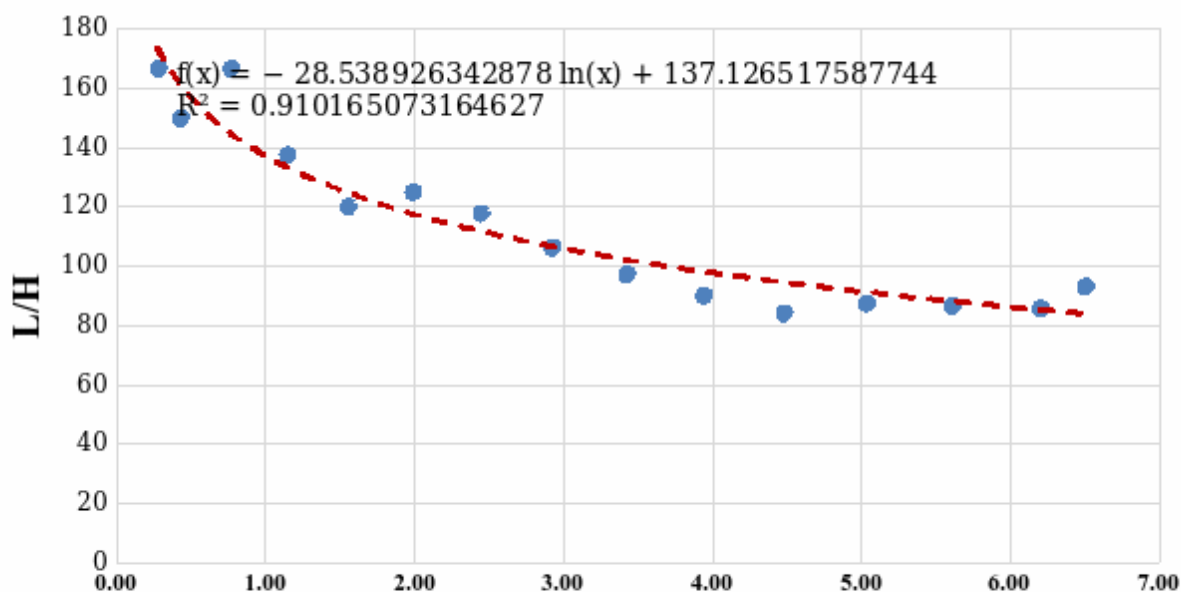


Рисунок 6. Зависимость относительной длины формирования потока L/H от нормализованного числа Рейнольдса

Заключение

В бетонном трапецеидальном канале ДМ-2 Джизакской системы машинных каналов длина полного формирования потока была количественно оценена с использованием трёхмерной модели в COMSOL Multiphysics. В расчётной области длиной 1000 м профили скорости по центральной вертикали, полученные через каждые 5 м, сравнивались с эталонным профилем по критерию NRMS. Условие $NRMS < 1\%$ было принято в качестве критерия достижения полностью сформировавшегося состояния потока. В исследованном диапазоне $H = 0,30\text{--}2,90$ м и $Re = 2,82 \cdot 10^5\text{--}6,51 \cdot 10^6$ длина полного формирования потока изменялась в пределах $L = 50\text{--}270$ м, а относительная длина – $L/H = 84,1\text{--}166,7$. При глубине $h = 1,20$ м длина формирования составила $L = 150$ м, после чего значения NRMS сохранялись ниже 1 %.

С практической точки зрения створ для установки бесконтактного радарного измерительного устройства рекомендуется выбирать на расстоянии $x \geq L$ от входного участка канала или другого источника гидравлического возмущения. Соблюдение данного условия способствует повышению устойчивости зависимости между поверхностной и средней по сечению скоростями потока и снижению дополнительной неопределённости при расчёте расхода воды.

Перспективным направлением дальнейших исследований является проверка предложенного подхода по данным натурных измерений на других бетонных и необлицованных каналах.

Список литературы

1. Киркгёз М.С., Ардычоглу М. Kırkgöz M.S., Ardiçoğlu M. Velocity profiles of developing and developed open channel flow // Journal of Hydraulic Engineering. – 1997. – Т. 123, № 12. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:12(1099).
2. Bauer C., Sakai Y., Uhlmann M. How far does the influence of the free surface extend in turbulent open channel flow? // Flow, Turbulence and Combustion. – 2025. – Т. 115. – DOI: 10.1007/s10494-025-00665-4.
3. Bhattarai B., Hilliard B., Tonina D., Reeder W.J., Budwig R., Martin B.T., Xing T. Evaluation of Reynolds-averaged Navier-Stokes turbulence models in open channel flow over salmon redds // Journal of Hydrodynamics. – 2024. – Т. 36, № 4. – DOI: 10.1007/s42241-024-0051-5.
4. Cho Y.-H., Dao M.H., Nichols A. Computational fluid dynamics simulation of rough bed open channels using OpenFOAM // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Т. 10. – DOI: 10.3389/fenvs.2022.981680.
5. Das S., Balachandar R., Barron R.M. Generation and characterization of fully developed state in open channel flow // Journal of Fluid Mechanics. – 2022. – Т. 934. – DOI: 10.1017/jfm.2021.1133.
6. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – Т. 3, № 2. – DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
7. Lazzarin T., Constantinescu G., Wu H., Viero D.P. Fully developed open channel flow over clusters of freshwater mussels partially buried in a gravel bed // Water Resources Research. – 2024. – Т. 60, № 8. – DOI: 10.1029/2023WR035594.
8. Mahananda M., Hanmaiahgari P.R., Balachandar R. On the turbulence characteristics in developed and developing rough narrow open-channel flow // Journal of Hydro-environment Research. – 2022. – Т. 40. – DOI: 10.1016/j.jher.2021.11.003.
9. Nezu I., Nakagawa H. Turbulence in open-channel flows. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1993.
10. Puri A.N., Kuo C.Y. Numerical modelling of subcritical open channel flow using the k- ϵ turbulence model and the penalty function finite element technique // Applied Mathematical Modelling. – 1985. – Т. 9, № 2. – DOI: 10.1016/0307-904X(85)90117-9.
11. Shounda J., Barman K., Debnath K. Double-averaged turbulence properties in rough bed open-channel flow: A review // Physics of Fluids. – 2026. – Т. 38, № 2. – DOI: 10.1063/5.0310991.
12. Tominaga A., Nezu I., Ezaki K., Nakagawa H. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows // Journal of Hydraulic Research. – 1989. – Т. 27, № 1. – DOI: 10.1080/00221688909499249.
13. Yao J., Chen X., Hussain F. Direct numerical simulation of turbulent open channel flows at moderately high Reynolds numbers // Journal of Fluid Mechanics. – 2022. – Т. 953. – DOI: 10.1017/jfm.2022.942.

14. Zampiron A., Cameron S.M., Stewart M.T., Marusic I., Nikora V.I. Flow development in rough-bed open channels: Mean velocities, turbulence statistics, velocity spectra, and secondary currents // *Journal of Hydraulic Research*. – 2023. – Т. 61, № 1. – DOI: 10.1080/00221686.2022.2132311.
15. Zampiron A., Ouro P., Cameron S.M., Stoesser T., Nikora V. Conservation equations for open-channel flow: Effects of bed roughness and secondary currents // *Environmental Fluid Mechanics*. – 2024. – Т. 24. – DOI: 10.1007/s10652-024-09992-y.

References

1. Kırkgöz M.S., Ardiçoğlu M. Kırkgöz M.S., Ardiçoğlu M. Velocity profiles of developing and developed open channel flow // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 1997. – Vol. 123, No. 12. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:12(1099).
2. Bauer C., Sakai Y., Uhlmann M. How far does the influence of the free surface extend in turbulent open channel flow? // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2025. – Vol. 115. – DOI: 10.1007/s10494-025-00665-4.
3. Bhattarai B., Hilliard B., Tonina D., Reeder W.J., Budwig R., Martin B.T., Xing T. Evaluation of Reynolds-averaged Navier-Stokes turbulence models in open channel flow over salmon redds // *Journal of Hydrodynamics*. – 2024. – Vol. 36, No. 4. – DOI: 10.1007/s42241-024-0051-5.
4. Cho Y.-H., Dao M.H., Nichols A. Computational fluid dynamics simulation of rough bed open channels using OpenFOAM // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10. – DOI: 10.3389/fenvs.2022.981680.
5. Das S., Balachandar R., Barron R.M. Generation and characterization of fully developed state in open channel flow // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2022. – Vol. 934. – DOI: 10.1017/jfm.2021.1133.
6. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1974. – Vol. 3, No. 2. – DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
7. Lazzarin T., Constantinescu G., Wu H., Viero D.P. Fully developed open channel flow over clusters of freshwater mussels partially buried in a gravel bed // *Water Resources Research*. – 2024. – Vol. 60, No. 8. – DOI: 10.1029/2023WR035594.
8. Mahananda M., Hanmaiahgari P.R., Balachandar R. On the turbulence characteristics in developed and developing rough narrow open-channel flow // *Journal of Hydro-environment Research*. – 2022. – Vol. 40. – DOI: 10.1016/j.jher.2021.11.003.
9. Nezu I., Nakagawa H. Turbulence in open-channel flows. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1993.
10. Puri A.N., Kuo C.Y. Numerical modelling of subcritical open channel flow using the k- ϵ turbulence model and the penalty function finite element technique // *Applied Mathematical Modelling*. – 1985. – Vol. 9, No. 2. – DOI: 10.1016/0307-904X(85)90117-9.
11. Shounda J., Barman K., Debnath K. Double-averaged turbulence properties in rough bed open-channel flow: A review // *Physics of Fluids*. – 2026. – Vol. 38, No. 2. – DOI: 10.1063/5.0310991.

12. Tominaga A., Nezu I., Ezaki K., Nakagawa H. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows // *Journal of Hydraulic Research*. – 1989. – Vol. 27, No. 1. – DOI: 10.1080/00221688909499249.
13. Yao J., Chen X., Hussain F. Direct numerical simulation of turbulent open channel flows at moderately high Reynolds numbers // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2022. – Vol. 953. – DOI: 10.1017/jfm.2022.942.
14. Zampiron A., Cameron S.M., Stewart M.T., Marusic I., Nikora V.I. Flow development in rough-bed open channels: Mean velocities, turbulence statistics, velocity spectra, and secondary currents // *Journal of Hydraulic Research*. – 2023. – Vol. 61, No. 1. – DOI: 10.1080/00221686.2022.2132311.
15. Zampiron A., Ouro P., Cameron S.M., Stoesser T., Nikora V. Conservation equations for open-channel flow: Effects of bed roughness and secondary currents // *Environmental Fluid Mechanics*. – 2024. – Vol. 24. – DOI: 10.1007/s10652-024-09992-y.