УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУН ИВП РАН

_____
В.О. Полянин
«7» апреля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных проблем Российской академии наук по диссертации **Ян Ханьлинь**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.16 - «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия».

Диссертация «Влияние вихревых образований на формирование структур на подстилающей поверхности в стационарных и осциллирующих потоках воды» выполнена в ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук.

Ян Ханьлинь в 2018 г. получил степень бакалавра технических наук по специальности «Науки об окружающей среде» в Ланьчжоуском университете транспорта, в 2021 г. окончил магистратуру на кафедре физика моря и воды суши физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В 2024 г. окончил аспирантуру Института водных проблем РАН.

По итогам обсуждения было принято следующее заключение.

Диссертационная работа Ян Ханьлинь посвящена актуальной проблеме гидродинамики – исследованию механизмов образования и развития вихревых структур в пограничных слоях потоков с обратным градиентом давления и их влиянию на формирование рельефа подстилающей поверхности. Представленное исследование имеет как фундаментальное значение для развития теории пограничного слоя и гидродинамической устойчивости, так и прикладное значение для моделирования процессов переноса наносов и донных деформаций в реках и каналах.

Актуальность темы исследования

Актуальность работы не вызывает сомнений и обусловлена тем, что, несмотря на значительное количество исследований в области гидродинамики открытых потоков, до настоящего времени отсутствует надежная физическая модель взаимодействия осциллирующих потоков с размываемой подстилающей поверхностью. Существующие модели, основанные на линейном

анализе устойчивости ламинарного движения, не позволяют с достаточной точностью предсказывать параметры донных форм, формирующихся при взаимодействии потока с размываемым дном. Предложенный автором подход, основанный на исследовании вихревых структур, возникающих в пограничном слое в зоне торможения течения, представляет собой новый взгляд на механизмы формирования гряд на подстилающей поверхности.

Анализ содержания и структуры диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 73 наименований и благодарностей. Общий объем работы составляет 63 страницы, включая 25 рисунков и 2 таблицы.

Во введении автор обосновывает актуальность темы, формулирует цели и задачи исследования, раскрывает научную новизну и практическую значимость работы, а также формулирует положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор современных представлений о процессах взаимодействия стационарного и осциллирующего потоков с подстилающей поверхностью. Автор детально анализирует исследования устойчивости движения в придонной области, механизмов образования вихрей и связи параметров вихрей с характеристиками потока. Отдельное внимание уделено критериям устойчивости течений (критерии Рэлея, Фьёртофта, Розенблюта-Симона), которые впоследствии используются для интерпретации экспериментальных данных. Материал главы свидетельствует о глубоком знании автором предмета исследования и современного состояния проблемы.

Вторая глава посвящена описанию лабораторных экспериментов, включая методику исследования формирования вихрей у подстилающей поверхности в стационарных потоках и методику моделирования образования гряд на размываемом дне осциллирующим потоком. Автор подробно описывает экспериментальную установку, процедуру проведения экспериментов и методы обработки результатов, что позволяет оценить достоверность полученных данных.

В третьей главе представлены результаты лабораторных экспериментов и их интерпретация. На основе анализа экспериментальных данных автор выявляет особенности деформации вертикального профиля скорости в пограничном слое потока с обратным градиентом давления в различных фазах процесса торможения жидкости. Особое внимание уделяется формированию локального минимума скорости с двумя точками перегиба на вертикальном профиле в фазе максимального торможения потока. Автор применяет критерии устойчивости течений для анализа условий, при которых происходит формирование вихрей, и показывает, что потеря устойчивости плоскопараллельного движения происходит в слое, содержащем верхнюю точку перегиба. Результаты экспериментов с осциллирующим потоком демонстрируют, что

формирование гряд на дне связано с образованием вихрей в фазах, в которых существует обратный градиент давления.

В заключении автор формулирует основные выводы и результаты исследования.

Оценка научной новизны и значимости результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые экспериментально получены вертикальные профили скорости в пограничном слое потока с обратным градиентом давления в различных фазах процесса торможения жидкости. Показано, что в фазе максимального торможения на профиле скорости формируется локальный минимум с двумя точками перегиба.
2. Экспериментально установлено, что потеря устойчивости ламинарного течения происходит в слое, содержащем верхнюю точку перегиба, при достижении критического значения перепада скорости. Это подтверждает применимость критерия Розенблюта-Симона для анализа устойчивости рассматриваемых течений.
3. Предложен и экспериментально обоснован новый механизм формирования гряд на размываемом дне в осциллирующем потоке, связывающий этот процесс с образованием и движением вихрей в фазах с обратным градиентом давления. Показано, что расстояние между грядами определяется расстоянием между вихрями, формирующимися в зоне торможения потока.
4. Установлено сходство механизмов взаимодействия потока с подстилающей поверхностью для стационарных и осциллирующих течений, что позволяет единообразно описывать эти ранее раздельно рассматриваемые явления.

Научная значимость результатов для специальности 1.6.16 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» заключается в углублении понимания процессов взаимодействия водных потоков с подстилающей поверхностью, что имеет фундаментальное значение для изучения русловых процессов, переноса наносов и формирования донного рельефа в реках и каналах. Предложенная автором физическая модель взаимодействия осциллирующего потока с размываемым дном дополняет и расширяет существующие представления о механизмах формирования русловых форм и может быть использована для совершенствования методов прогнозирования русловых деформаций.

Оценка корректности математического аппарата и достоверности результатов

Теоретический анализ проблемы основан на фундаментальных уравнениях гидродинамики и классических критериях устойчивости течений. Математический аппарат, используемый для анализа устойчивости течений и интерпретации экспериментальных данных, корректен и соответствует современному уровню развития науки.

Достоверность полученных результатов обеспечена:

- тщательной разработкой и реализацией экспериментальных методик;
- применением современных методов обработки и анализа данных, включая статистический анализ с оценкой доверительных интервалов;
- хорошим соответствием экспериментальных данных с теоретическими прогнозами и результатами других исследователей (в частности, отмечается хорошее соответствие расчетных параметров вихрей с экспериментальными данными Wang et al., 2019);
- физической обоснованностью предложенного механизма формирования гряд на размываемом дне.

Анализ экспериментальной базы исследования

Экспериментальная база исследования представляется достаточной и адекватной поставленным задачам. Автор использует лабораторную установку кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова – прямой канал с прозрачными стенками длиной 3,5 м, что позволяет моделировать как стационарные, так и осциллирующие потоки.

Для визуализации потока и измерения скоростей используются частицы полистирола нейтральной плавучести, что является стандартным подходом в экспериментальной гидромеханике. Автор корректно учитывает возможные источники экспериментальных погрешностей и проводит статистический анализ данных с использованием распределения Стьюдента для построения доверительных интервалов.

Диапазон чисел Рейнольдса ($3150 < Re < 12400$) и других безразмерных параметров, использованных в экспериментах, соответствует реальным условиям в природных водотоках, что повышает практическую значимость полученных результатов.

Практическая значимость результатов

Практическая значимость диссертационной работы определяется возможностью использования полученных результатов для прогнозирования формирования донных форм в реках и каналах, что имеет важное значение для решения инженерных задач:

- проектирования гидротехнических сооружений с учетом возможных русловых деформаций;
- оценки устойчивости русел рек и каналов;
- расчета транспорта наносов в водных объектах;
- моделирования процессов размыва и аккумуляции донных отложений.

Предложенная автором методика экспериментального исследования формирования гряд на дне осциллирующим потоком может быть использована при проведении лабораторных исследований русловых процессов.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных соискателем работах

По результатам исследований опубликовано 6 научных работ, из них 4 статьи в журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией РФ.

Статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях из списка ВАК:

1. Мельникова О.Н. Особенности течение в пограничном слое потока с обратным градиентом давления./ Мельникова О.Н, Показеев К.В, **Ян Х.**// ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. 2021. Т. 85. № 1. С. 134–139. [DOI: 10.31857/S0367676521010233]
2. Мельникова О.Н. Деформация вертикального профиля скорости в процессе торможения потока с обратным градиентом давления./ Мельникова О.Н, **Ян Х.**// Вестник Московского Университета. Серия 3 «Физика и астрономия». 2021. №2. С.49–54. [DOI: 10.3103/s0027134921020077]
3. Мельникова О.Н. Устойчивость ламинарного течения на границе равномерного и замедляющегося потоков./ Мельникова О.Н. **Ян Х.**// ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. 2022. Т. 86. № 2. С. 238–242. [DOI:10.31857/S036767652202020X]
4. Мельникова О.Н. Образование гряд на дне осциллирующим потоком./ Мельникова О.Н, Иванова И.Н, **Ян Х.**// ПРОЦЕССЫ В ГЕОСРЕДАХ. 2024. Т.39. № 1. С. 2380–2386.

Статьи в других изданиях:

1. Мельникова О.Н. Особенности течения жидкости в пограничном слое потока с обратным градиентом давления./ Мельникова О.Н, **Ян Х.**// М.: Конференция «Волны-2020». – 2020, – Т.9, – С.4–7, Москва, Россия.
2. **Ян Х**. Экспериментальное исследование течения жидкости в пограничном слое потока с обратным градиентом давления. //М.:МАКС Пресс, 2020. – Материалы международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020». – 2020, Москва, Россия. [ISBN 978-5-317-06417-4]

В опубликованных материалах изложена вся основная информация, полученная в рамках диссертационного исследования.

Заключение

Диссертационная работа Ян Ханьлинь «Влияние вихревых образований на формирование структур на подстилающей поверхности в стационарных и осциллирующих потоках воды» представляет собой завершенное научное исследование, выполненное на высоком теоретическом и экспериментальном уровне. Результаты работы имеют существенное значение для развития теории гидродинамической устойчивости и механики русловых процессов.

Автор демонстрирует глубокое знание предмета исследования, владение современными методами экспериментального анализа и умение интерпретировать полученные результаты в контексте существующих теорий. Диссертационная работа отличается логичностью построения, четкостью формулировок и обоснованностью выводов.

Поставленные в диссертации задачи решены в полном объеме, защищаемые положения убедительно обоснованы экспериментальными данными. Научная новизна и практическая значимость результатов не вызывают сомнений. Работа выполнена диссертантом самостоятельно, посвящена актуальной теме, содержит новые, научно значимые результаты, имеет практическую значимость.

Выводы

Диссертацию «Влияние вихревых образований на формирование структур на подстилающей поверхности в стационарных и осциллирующих потоках воды» Ян Ханьлинь, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.16 - «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия», рекомендуется принять к предварительному рассмотрению на заседании Диссертационного совета 24.1.040.01 при ИВП РАН.

Заключение рассмотрено и утверждено комиссией секции Ученого совета «Гидрология суши, водные ресурсы, управление» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных проблем Российской академии наук 02.04.2025.

Члены комиссии:

Главный научный сотрудник ИВП РАН, д.т.н., председатель секции Ученого совета	М.В. Болгов
Главный научный сотрудник ИВП РАН, д.т.н.	В.В. Беликов
Ведущий научный сотрудник ИВП РАН, д.т.н.	Е.И. Дебольская
Старший научный сотрудник ИВП РАН, к.т.н.	Е.Н. Долгополова
Научный сотрудник ИВП РАН, к.г.н., ученый секретарь секции Ученого совета	Е.Д. Панченко