

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ ПРИ НАЛИЧИИ
ВЕТРА»**

Выполнил студент

204м группы:

Сухарев Дмитрий Андреевич

_____ подпись студента

Научный руководитель:

ассистент, к.ф.-м.н.

Плаксина Юлия Юрьевна

_____ подпись научного руководителя

Допущен к защите < _____ >

Зав. кафедрой _____
подпись зав. кафедрой

Москва

2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Приповерхностное течение при наличии обдува (ветра) и испарения с поверхности (литературный обзор).....	6
Глава 2. Исследование конвективного течения при обдуве поверхности воды в лабораторных условиях	13
2.1. Измерение поля скорости конвективного течения в объёме методом цифровой трассерной визуализации.....	13
2.2. Использование тепловизора для изучения движения поверхности воды при обдуве. (ИК-цифровая трассерная визуализация).....	14
2.3. Экспериментальные установки.....	15
Глава 3. Результаты измерений поля температуры и скорости в условиях наличия поверхностной плёнки и свободной поверхности в процессе обдува..	18
3.1. Определение условий перехода свободная поверхность-плёнка с помощью тепловизора.....	18
3.2. Поле скорости в объеме воды вблизи поверхности.....	27
3.3. Визуальное наблюдение полос расположенных на поверхности параллельно скорости ветра, при механизмах конвекции схожих с циркуляцией Ленгмюра.....	30
ВЫВОДЫ.....	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	35
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	36

ВВЕДЕНИЕ

Расчет скорости испарения при наличии обдува (ветра) является очень важной для практики задачей теплофизики и геофизики. На сегодняшний день разработаны эмпирические соотношения, позволяющие сделать такой расчет, исходя из разности температур воды и воздуха, относительной влажности вдали от поверхности и скорости ветра на определенной высоте над поверхностью. Очевидно, что такой подход требует знания эмпирических констант, зависящих от геометрии задачи. Определение этих коэффициентов является трудоемкой инженерной задачей, а базы данных по таким коэффициентам суммируются для теплофизических приложений (например, ASHRAE) и геофизических задач (например, TOGA COARE). В то же время, огромную важность с развитием численных методов приобретают прямое моделирование и решение сопряженной задачи теплообмена на границе раздела «жидкость-газ». Такое моделирование позволило бы существенно улучшить ситуацию с расчетами приповерхностных течений при наличии ветра (обдува).

Появившиеся в последние годы новые экспериментальные методы такие как ИК-термография высокого разрешения, метод цифровой трассерной визуализации (или PIV – Particle Image Velocimetry), метод определения скорости на поверхности воды, основанный на анализе полей температуры, полученных с помощью ИК-термографии, теневой фоновый метод (ТФМ) позволяют более подробно изучить гидродинамические процессы вблизи поверхности. Однако до сих пор нет точных моделей, которые позволили бы написать программу и провести численный расчет процессов на границе раздела сред.

Термин «холодная пленка» хорошо известен в теплофизике и геофизике. Он связан с наличием сильного градиента температуры у поверхности при испарении жидкости и ее охлаждении. Известно также, что при наличии обдува

(ветра) при определенной скорости (которая у разных авторов разная) эта пленка рвется, и приповерхностное течение сильно перестраивается.

Как правило, под холодной пленкой понимается узкая приповерхностная зона жидкости с высоким градиентом температуры [1], но такой взгляд на проблему является упрощенным. Эта пленка является реальным реологическим объектом с константами адсорбции и десорбции примесей, диффузией из объема в адсорбционный слой и всеми остальными атрибутами такой системы. Гидродинамическое моделирование требует знания прочности пленки и применения реологических поверхностных моделей [2].

Особенно ярко проблема поверхностной пленки проявляется в геофизической задаче, называемой циркуляцией Ленгмюра. При наличии ветра в определенный момент времени наблюдается резкое перестроение поверхности – все загрязнения собираются валы, хорошо фиксируемые визуально [3]. Существует значительное количество, как геофизических наблюдений, так и попыток моделирования такой задачи [4-8]. Еще в работе Лейбовича [9] было показано, что такое моделирование описывает все стадии процесса, но уже после появления валов. Проблема заключается в использовании в данной модели стандартных граничных условий – на свободной поверхности условия проскальзывания. Это приводит к тому, что не наблюдается скачкообразного перехода к новой структуре при увеличении скорости ветра. Этот переход, по нашему мнению, определяется разрывом поверхностной пленки, не описываемым стандартными гидродинамическими условиями, а после ее разрыва проблем с описанием уже не возникает. Важной особенностью любого течения при наличии ветра является усиление испарения с поверхности, что учитывается во всех эмпирических моделях. Причина этого явления понятна и связана с улучшением отвода испарившихся молекул от поверхности. По этой причине традиционные двумерные модели течения (по типу течений Куэтта) усложняются, появляется дополнительное вертикальное перемещение массы,

связанное с теплообменом. Решения задач устойчивости течений при воздействии ветра на поверхность жидкости показало, что существуют критические значения параметров задачи, определяющие ориентацию вихревых конвективных ячеек [6,8]. Таким образом, на горизонтальный поток, направленный вдоль оси x , накладывается движение в двух других направлениях. Именно это и является причиной возникновения «валов». Современные теплофизические измерения позволяют фиксировать появление таких валов еще до разрыва поверхностной пленки.

Несмотря на важность натуральных наблюдений, моделирование процессов при наличии ветра в лабораторных условиях всегда рассматривалось как очень важный и полезный метод исследований [10]. Конечно, в этом случае нельзя говорить о полном соответствии течения в канале и течения на реальной теплофизической установке или течения в океане или внутреннем водоеме. Поперечный размер течения ограничивается стенками, и стенки очень существенно влияют на развитие течения и его устойчивость. В то же время, такие наблюдения позволяют понять некоторые особенности такого течения. Так, например, можно исследовать прочность поверхностной пленки и профиль скорости вблизи поверхности.

Целью работы является экспериментальное исследование конвективных течений, создаваемых при обдуве, в Т-образном канале с применением двух современных методов визуализации, а именно, ИК-термографии высокого разрешения и метода цифровой трассерной визуализации.

В результате таких измерений появляется возможность определить условия разрыва поверхностной пленки и сравнить поля скорости вблизи поверхности при наличии пленки и при ее отсутствии.

Глава 1. Приповерхностное течение при наличии обдува (ветра) и испарения с поверхности (литературный обзор)

Перемешивание и турбулентность играют большую роль во взаимодействии «воздух-вода». В результате таких взаимодействий в поверхностном слое часто возникают хорошо организованные структуры, называемые когерентными [8]. Яркий пример таких структур – циркуляции Ленгмюра.

Атмосфера и океан представляют собой связанную систему. Они постоянно обмениваются массами, теплом, импульсом и энергией. Земная поверхность примерно на 70% покрыта водой, поэтому воздушно-морские взаимодействия играют жизненно важную роль в морской среде и атмосферных системах. Все эти взаимодействия между океаном и атмосферой формируют погоду и могут глобально изменять климат. Например, энергия ветра над поверхностью океана образует волны, течения и мелкомасштабные поверхностные турбулентности, которые могут потенциально влиять на поверхностные тепловые потоки [11]. Волновое разрушение играет очень важную роль в воздушно-морских взаимодействиях, усиливая обмен тепла, массы и импульса [12]. На поверхности океанов или озер при наличии ветра часто можно наблюдать длинные полосы или валки, приблизительно совпадающие с направлением ветра, типичная картина представлена на рисунке 1.1. В 1938 году Ирвинг Ленгмюр наблюдал это явление и продемонстрировал, что эти полосы были связаны с продольными подводными вихрями в озере [13]. Это явление теперь носит его имя.



Рисунок 1.1 Поверхность водоёма с ветровыми волнами и полосами циркуляции Ленгмюра [14].

Полосы также могут появляться при наличии пузырьков, водорослей и мусора на поверхности воды. На рисунке 1.2 показаны полосы, визуализированные токсичными водорослями в немецкой бухте Северного моря, сфотографированные в августе 1988 года.



Рисунок 1.2. Полосы водорослей на поверхности при циркуляции Ленгмюра [14].

Существуют разные масштабы циркуляции Ленгмюра. Обычно валки, которые мы видим, имеют масштаб от 2 до 300 метров, в то время как циркуляция Ленгмюра имеет масштаб менее 1 метра. Ленгмюр говорил, что количественные измерения расстояний между полосами затруднены, потому что между четко очерченными полосами множество мелких и менее четко выраженных потоков. Из-за того, что большие волны содержат мелкие волны, кажется, что поверхности больших вихрей состоят из более мелких вихрей. Это утверждение говорит о том, что небольшие ленгмюровские циркуляции существуют. Однако из-за технологических ограничений, ученые обычно наблюдают крупномасштабную циркуляцию Ленгмюра.

На основании наблюдений Ленгмюра в 1938 году [13] были сделаны многочисленные другие наблюдения с использованием доплеровских сонаров [15-16]. С их помощью наблюдали трехмерное течение в смешанных слоях и линии сходимости поверхности протяженностью до двух километров и шириной от 120 до 180 метров. Смит в своей работе [17] описал акустические доплеровские измерения скорости у побережья Калифорнии и показал, что соотношение расстояния и глубины циркуляции ячеек Ленгмюра растёт по мере развития циркуляции Ленгмюра. Циркуляция Ленгмюра рассматривается сейчас как важный турбулентный процесс, который играет решающую роль в создании и поддержании однородного поверхностного смешанного слоя [14].

Таким образом, когда ветер начинает дуть над границей воздух-вода, возникает течение и поверхностные волны. Взаимодействие ветровых волн и течений приводит к генерации циркуляции Ленгмюра, которая состоит из вращающихся в противоположные стороны вихрей, выровненных ветром (их вы можете видеть на схеме на рисунке 1.3). В нисходящем потоке могут образовываться полосы пузырьков или плавучих водорослей.

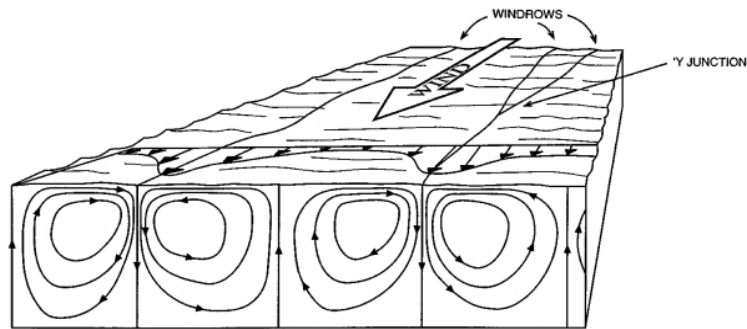


Рисунок 1.3. Схема циркуляции Ленгмюра [14].

В настоящее время принято считать, что океанические циркуляции Ленгмюра возникают в результате взаимодействия стоковых дрейфов, генерируемых волнами с приповерхностными сдвиговыми потоками. В 1977 году Крейк и Лейбович впервые обнаружили этот механизм [9,18]. Впоследствии его стали называть механизмом Крейка-Лейбовича.

Уравнение Навье-Стокса в приближении Крейка-лейбовича преобразуется к виду

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla \pi + \mathbf{u}_s \times \nabla \times \mathbf{u} + \beta g \theta + \gamma_T \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1.1)$$

где θ – изменение температуры, π – давление, β – коэффициент теплового расширения, \mathbf{u} – вектор средней скорости в потоке, $\beta g \theta$ – архимедова сила в приближении Буссинеска, последнее слагаемое соответствует стандартному вязкостному члену. Как видно из (1.1), основной особенностью уравнения движения является добавление «вихревой силы»

$$\mathbf{f} = \mathbf{u}_s \times \boldsymbol{\omega} \equiv \mathbf{u}_s \times \nabla \times \mathbf{u} \quad (1.2)$$

где \mathbf{u}_s – скорость потока в направлении ветра, $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u}$ – завихренность.

Именно вихревая сила и приводит, в конечном итоге, к созданию крутящего момента и появлению полос [19].

В последние годы глобальное изменение климата и растущее загрязнение атмосферы и океанов, заставили обратить внимание на мелкомасштабные процессы переноса на поверхности вода-воздух [20]. Тепловые потоки вода-воздух проходят через молекулярный диффузионный подслоя поверхности океана. На рисунке 1.4 приведено типичное распределение скорости в приповерхностном вязком слое с характерной толщиной δ_{zu} , которая оказывается порядка 1-2 мм. [21].

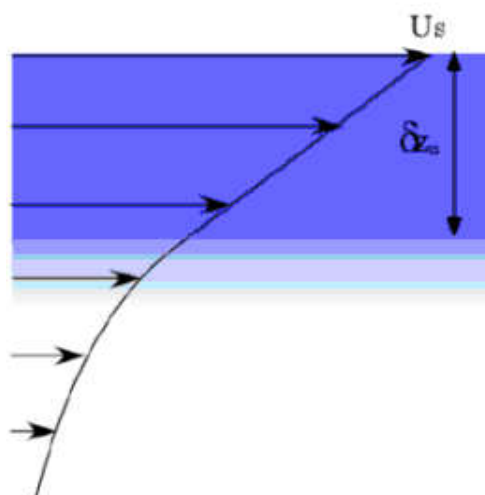


Рисунок 1.4. Распределение скорости в верхнем слое океана. [21]

Установлено что скорость теплообмена между воздухом и морем зависит от кинематики и динамики поверхности. Таким образом, очевидно, что мелкомасштабная циркуляция Ленгмюра должна влиять на структуру приповерхностной кинематики. Действительно, в работах Мелвилла и Верона [22, 23], мелкомасштабная циркуляция Ленгмюра приводит к быстрому перемешиванию поверхностного слоя. В результате было показано, что циркуляция Ленгмюра обеспечивает быстрый и эффективный способ эффективного перемешивания холодной пленки [24]. Циркуляция Ленгмюра, имеющая масштабы порядка 1-10 см, называется мелкомасштабной

циркуляцией Ленгмюра. Такую мелкомасштабную циркуляцию наблюдал Кенни [25] как когерентные полосы водорослей в поверхностном слое. В 2001 году были проведены количественные лабораторные и полевые измерения поверхностных течений под действием ветра [24]. В 2008 с помощью инфракрасных камер и методов цифровой трассерной визуализации были представлены доказательства существования мелкомасштабных циркуляций [26]. На рисунке 1.5 представлено изображение поля скорости для мелкомасштабной циркуляции Ленгмюра при взаимодействии воздуха и моря, полученное с помощью метода цифровой трассерной визуализации (PIV), ось z соответствует оси, перпендикулярной поверхности. Однако, несмотря на наличие математических моделей, описывающих циркуляцию Ленгмюра, до сих пор не ясно, в какой момент времени и при каких параметрах появляются полосы на поверхности воды, которые можно наблюдать визуально. Это всегда отмечал и Лейбович – модель хорошо описывает циркуляции, но только при условии, что они начались, само начало циркуляций модель не предсказывает.

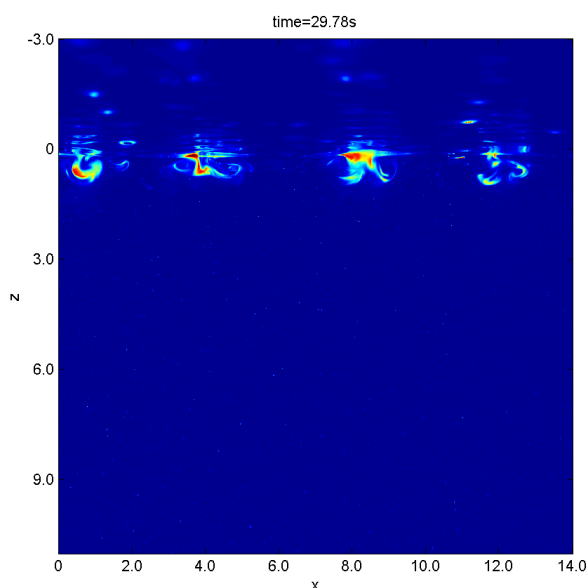


Рисунок 1.5. Изображение поля скорости для мелкомасштабной циркуляции. [26]

Исследования, проводимые в нашей лаборатории [27], позволили предположить, что появление такого рода циркуляций связано со сложной реологией поверхности воды – при определенной скорости ветра пленка рвется, и возникают циркуляции. Поверхность с пленкой и без нее очень существенно отличается именно по двум измеряемым в работе параметрам – полю температур на поверхности и полю скоростей в приповерхностном слое. По этой причине и можно решить поставленную задачу определения условий разрыва поверхностной пленки и определения изменений в параметрах приповерхностного течения.

Глава 2. Исследование конвективного течения при обдуве поверхности воды в лабораторных условиях.

2.1. Измерение поля скорости конвективного течения в объеме методом цифровой трассерной визуализации.

Для измерения поля скорости в объеме воды под поверхностью мы использовали метод цифровой трассерной визуализации (или PIV - Particle Image Velocimetry). Данный метод позволяет регистрировать мгновенные (точнее, средние между кадрами) поля скорости в плоскости измерения.

Суть метода состоит в фото или видео съемке жидкости, засеянной частицами нейтральной плавучести в освещенной лазерным листом плоскости. Сравнение кадров сделанных через некоторый интервал времени позволяет определить смещения частиц за этот интервал и тем самым определить скорость частиц и построить поле скоростей. На рисунке 2.1. представлена схема установки для реализации PIV метода.

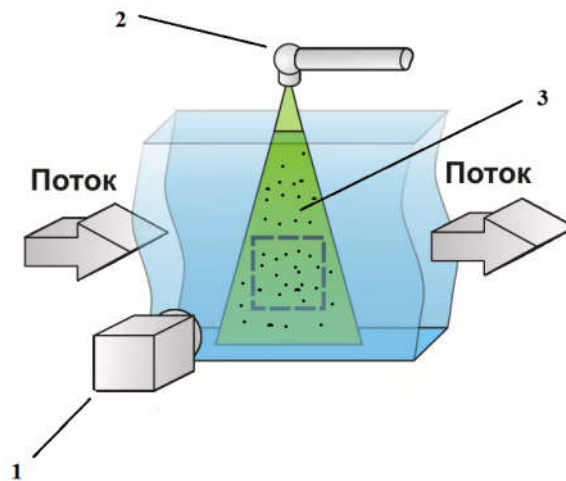


Рисунок 2.1: Схема установки для цифровой трассерной визуализации: 1 – фотокамера; 2 – лазер с цилиндрической линзой; 3 – лазерный лист, подсвечивающий частицы нейтральной плавучести в жидкости.

В качестве частиц нейтральной плавучести использовались полые стеклянные сферы Glass Hollow Spheres 110 P8, размером 10-20 мкм. Над прозрачным бассейном фиксировался зелёный твердотельный лазер, луч которого разворачивался в плоскость с помощью цилиндрической вогнуто-плоской линзы. Освещенная плоскость снималась на цифровую фотокамеру (Canon EOS 550D), после чего кадры обрабатывались соответствующим программой, в основу которой лёг кросс-корреляционный метод сравнения изображений. Программа была написана старшим научным сотрудником нашей кафедры Н. А. Винниченко. Концентрация частиц, при которой поле скорости визуализируется наилучшим образом, подбиралась экспериментально.

2.2. Использование тепловизора для изучения движения поверхности воды при обдуве. (ИК-цифровая трассерная визуализация)

Для получения поля температуры поверхности нами использовался тепловизор с высоким разрешением (520X640 пикселей) FLIR 7700. Для нас наибольший интерес представляла именно сама структура поля температуры, а не её абсолютные значения. По характерным структурам можно судить о наличии поверхностной плёнки на поверхности, либо об её отсутствии. Так же применяя программу для метода цифровой трассерной визуализации можно найти скорости движения термических структур. На рисунке 2.2 приведен пример съёмки прямоугольной части канала, где одна часть находится под плёнкой, а другая свободна от неё.

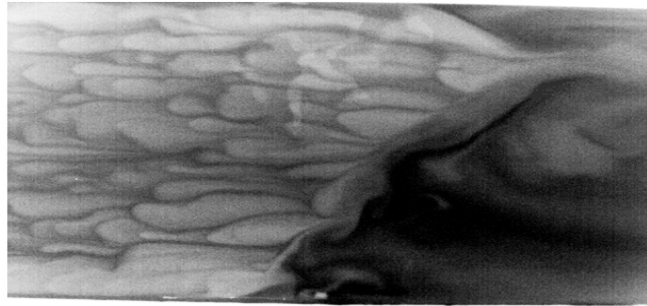


Рисунок 2.2. Поле температур на поверхности канала (тепловизор FLIR 7700) в водопроводной воде. Слева поверхность, свободная от пленки с мелкоячеистой структурой конвекции Марангони, справа более холодная поверхность с плёнкой. Воздушный поток слева направо.

2.3. Экспериментальные установки.

Для наших исследований мы использовали два Т-образных канала разных размеров, один из них длиной более трёх метров и шириной 15 см, находился на кафедре вод моря и суши (см. рисунок 2.3), а другой имел длину в три раза меньше, но с дополнительной продольной перегородкой, позволяющей менять ширину канала от 0 до 20 см, точнее, отделять Т-образный канал с переменной шириной от застойной зоны, которая изолирована и не влияет на течение в канале. Такой канал был сделан специально для этой работы на нашей кафедре (см. рисунок 2.4)

В обоих случаях обдув поверхности производился вентилятором с регулируемой мощностью. Скорость потока воздуха измерялась анемометром PCE-423 на входе канала и над границей раздела пленка – свободная поверхность. На этих установках реализовывались методы измерений, описанные выше. Для измерения поля скорости под поверхностью на коротком канале мы использовали ту же установку для цифровой трассерной визуализации, что изображена на схеме установки для длинного канала. В

начале канала всегда устанавливался рассекатель из трубочек, чтоб поток воздуха был более однородным в вертикальном сечении.

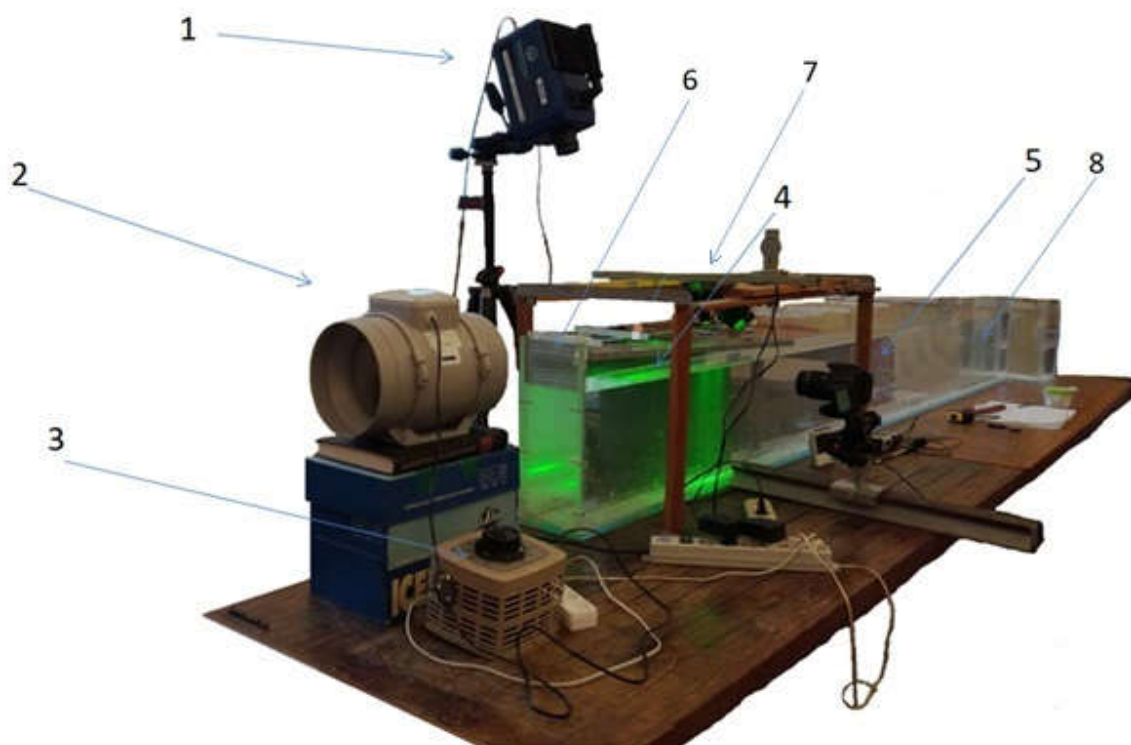


Рисунок 2.3. Установка, находящаяся на кафедре вод моря и суши.
1 - тепловизор, 2 - вентилятор, 3 - трансформатор, 4 - лазерный лист, 5 - фотокамера, 6 – рассекатель, 7 – лазеры, 8 – Т-образный бассейн с водой.
(Длина канала – 317 см, ширина – 15 см, глубина – 31 см, ширина и длина прямоугольной части в конце Т-образного канала – 18 см и 45 см)

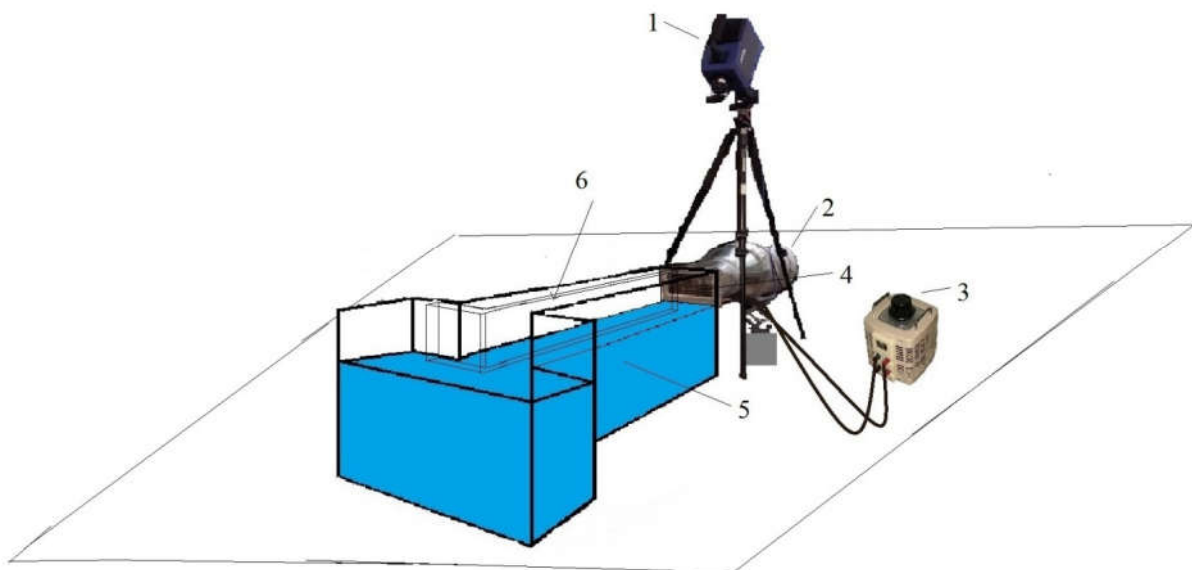


Рисунок 2.4. Установка, находящаяся на нашей кафедре.

1 - тепловизор, 2 - вентилятор, 3 - трансформатор, 4 - рассекаатель, 5 - Т-образный бассейн с водой, 6 – перегородка из оргстекла (Длина канала – 114 см, ширина – 20 см, глубина – 29 см, ширина и длина прямоугольной части в конце Т-образного канала – 19 см и 47 см).

Глава 3. Результаты измерений поля температуры и скорости в условиях наличия поверхностной плёнки и свободной поверхности в процессе обдува.

3.1. Определение условий перехода свободная поверхность-плёнка с помощью тепловизора.

С помощью тепловизора мы снимали поверхность воды при разных скоростях обдува поверхности и фиксировали положение границы раздела плёнка – свободная поверхность, а также определяли скорости движения тепловых структур, применяя метод ИК-трассерной визуализации, где для обработки применяется та же программа, что и при обычном методе цифровой трассерной визуализации, только тут в качестве частичек выступают мелкие термические структуры. Пример таких измерений приведён на рисунке 3.1. Чем темнее цвет на снимке с тепловизора, тем холоднее поверхность воды.

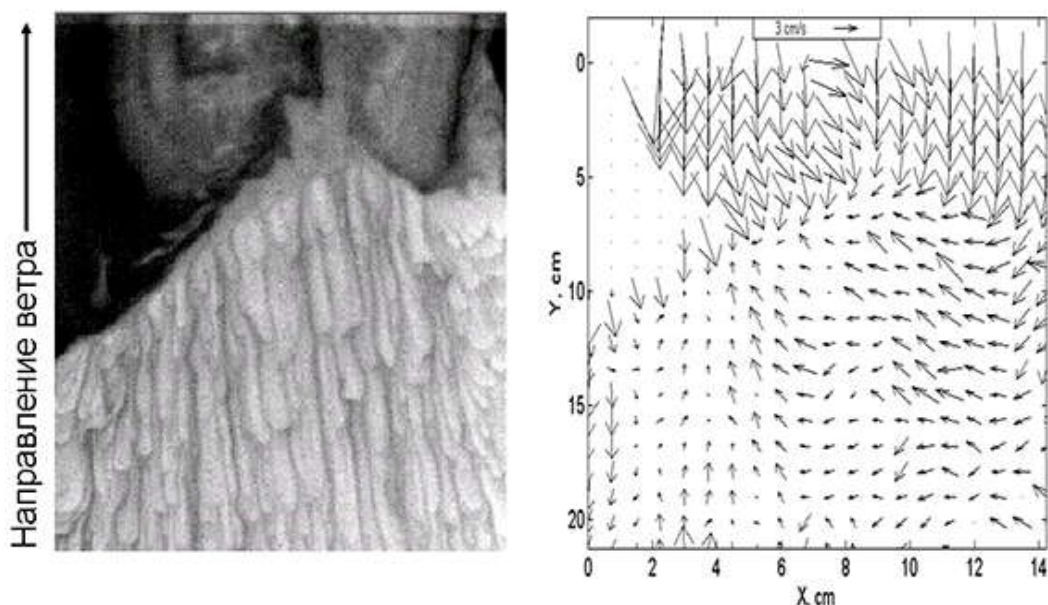


Рисунок. 3.1. Термическая структура поверхности воды при обдуве со скоростью 4,8 м/с (слева) и соответствующее ему поле скорости, полученное с помощью ИК-цифровой трассерной визуализации (справа), скорость над границей раздела свободная поверхность – плёнка 4 м/с, ширина канала 20 см.

Можно отметить, что в области со свободной поверхностью горизонтальные составляющие скорости преимущественно направлены вдоль скорости ветра, тогда как поверхность плёнки может двигаться в разных направлениях, и она эти направления меняет. Как можно видеть на рисунке 3.1. поверхность плёнки движется в противоположном ветру направлении, а на рисунке 3.2. при тех же параметрах ветра, но в более поздний момент времени часть плёнки движется по направлению скорости ветра, часть против скорости ветра. Это подтверждает проведенные ранее в нашей группе исследования, что плёнка движется исключительно в горизонтальной плоскости.

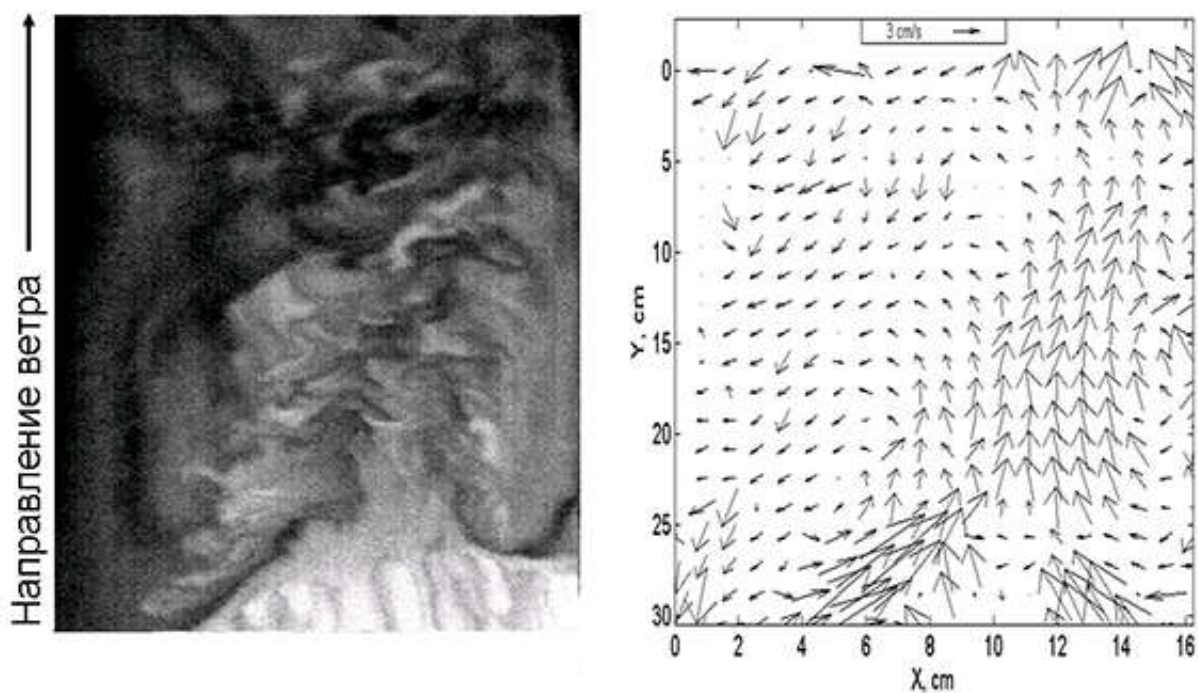


Рисунок. 3.2. Термическая структура поверхности воды при обдуве со скоростью 4,8 м/с (слева) и соответствующее ему поле скорости, полученное с помощью ИК-цифровой трассерной визуализации (справа), скорость над границей раздела свободная поверхность – плёнка 4 м/с, ширина канала 20 см, область съёмки на 16 см выше по течению, чем на рисунке 3.1.

Сначала вся поверхность воды была закрыта плёнкой, потом при достижении определенной скорости обдува происходил разрыв пленки в некоторой области вблизи вентилятора, и постепенно площадь свободной поверхности увеличивалась до некоторого значения, в зависимости от скорости ветра. Сначала мы исследовали зависимость положения границы разрыва поверхности и скорости ветра над границей разрыва пленки от начальной скорости вблизи вентилятора. Предполагалось, что граница раздела при увеличении скорости ветра будет сдвигаться таким образом, что скорость на границе раздела будет постоянной. Однако в реальности это оказалось не так. На рисунке 3.3. представлена связь скорости над границей раздела свободная поверхность - плёнка со скоростью обдува в начале короткого канала при разных значениях ширины этого канала, измерившихся в разные дни при температуре воды 19,5-20,5⁰С и относительной влажности 29,4-31,4%. Скорость ветра над границей измерялась по центру канала на высоте приблизительно 1 см, где она переставала зависеть от высоты. Измерение скорости велось в течении минуты и усреднялась по времени, разброс значений скорости не превышал $\pm 0,3$ м/с. На рисунке видна хорошая повторяемость измерений. Значения скорости при ширине канала 15 см и 20 см не сильно отличаются друг от друга, видимо при ширине канала начиная с 15 см граничные эффекты от стенок канала перестают сильно влиять. На следующих рисунках 3.4. и 3.5. сравниваются результаты, полученные в коротком и длинном канале. Ширина короткого канала была выставлена такая же, как и в длинном 15 см. В длинном канале плёнка начинает рваться при большей скорости ветра и расстояние, на котором расположена граница меньше, чем в коротком канале при той же скорости обдува. Возможно, это связано с тем, что общая площадь поверхности воды в длинном канале больше и накапливается на ней большее количество загрязнений.

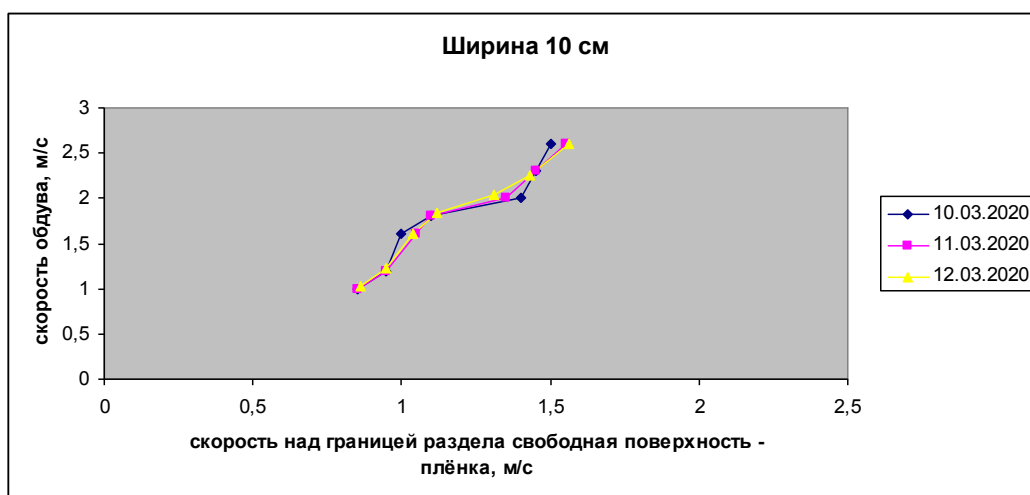
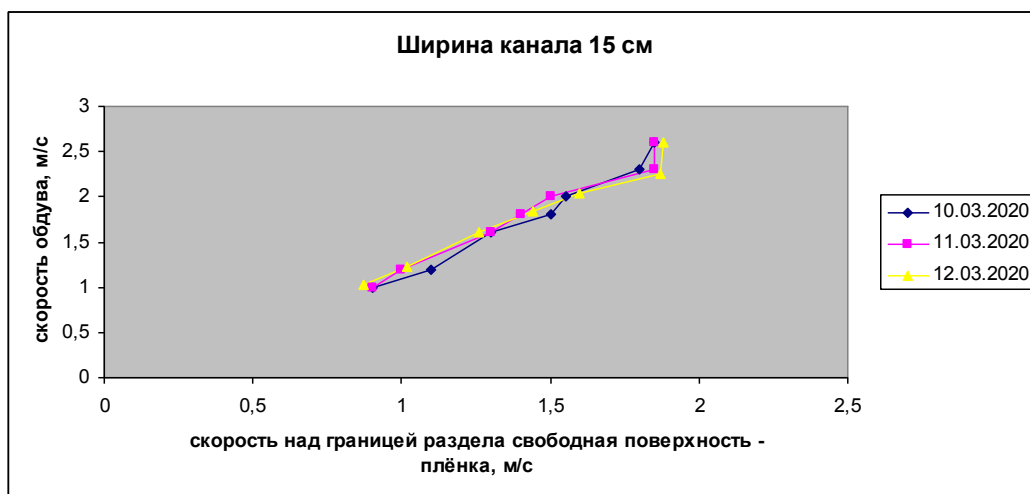
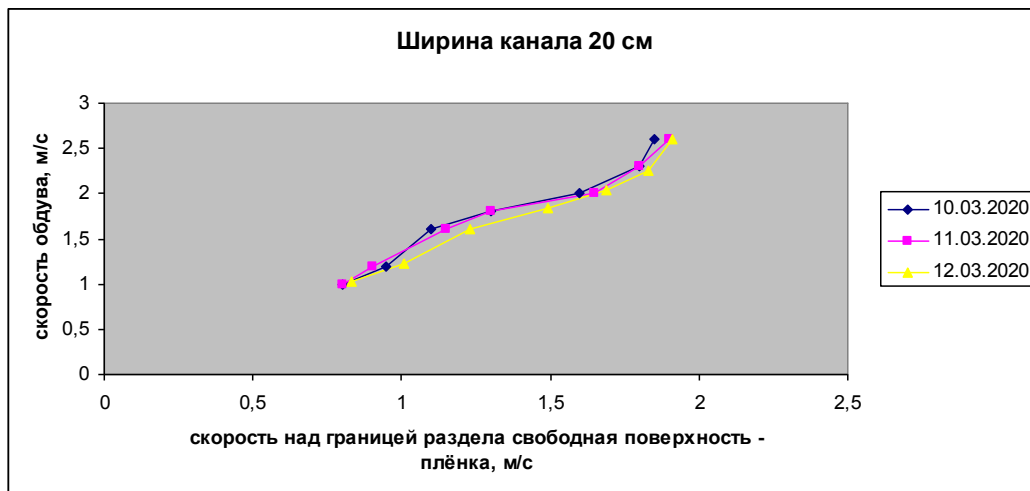


Рисунок 3.3. Взаимосвязь скорости ветра над границей раздела свободная поверхность – плёнка, со скоростью обдува в начале короткого канала при разной ширине канала.

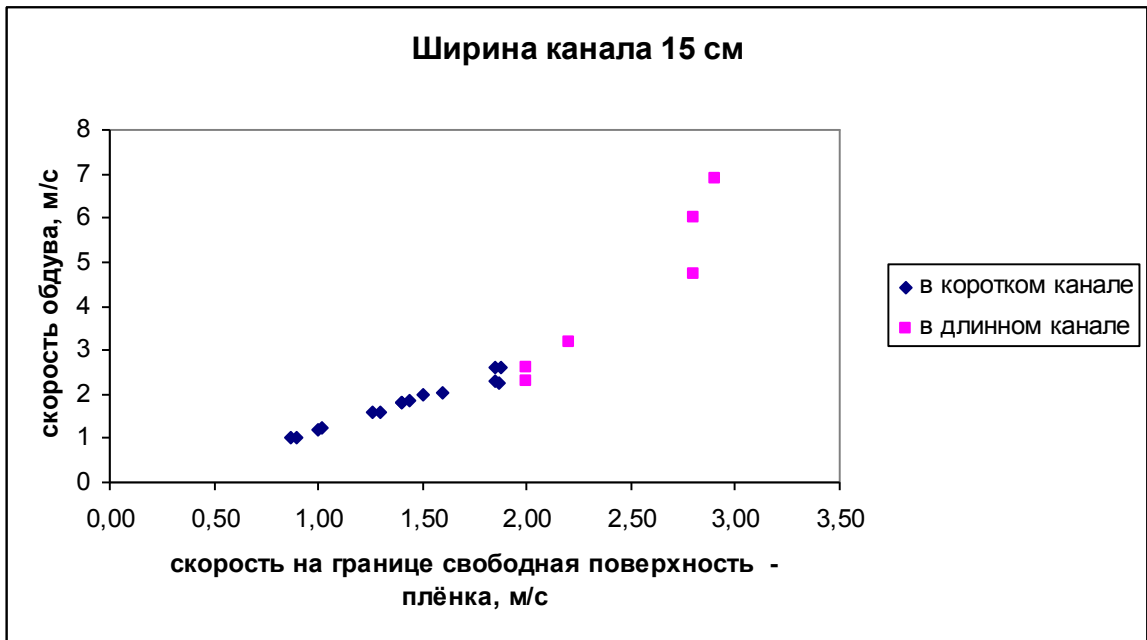


Рисунок. 3.4. Взаимосвязь скорости ветра над границей свободная поверхность – плёнка, со скоростью обдува в начале канала при разной длине канала и одной ширине.

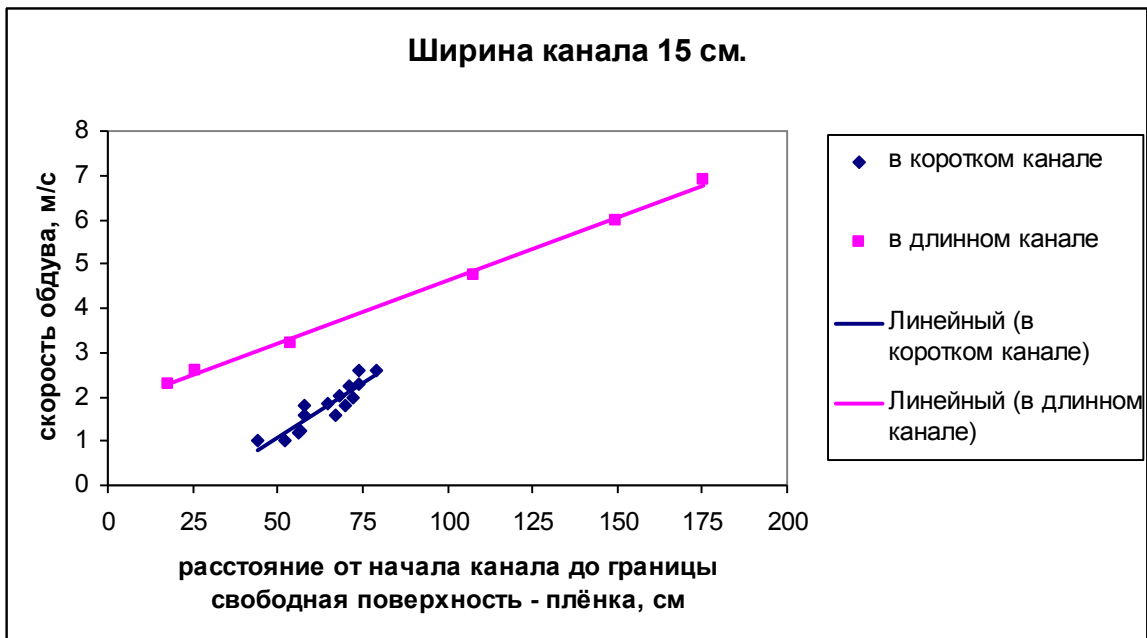


Рисунок 3.5. Взаимосвязь расстояния от начала канала до границы раздела свободная поверхность – плёнка, со скоростью обдува в начале канала при разной длине канала и одной ширине.

При повторных измерениях в один и тот же день, оказалось, что скорость обдува, при которой рвётся плёнка и скорость на границе свободная поверхность - плёнка становятся меньше, по сравнению с первым измерением, а площадь свободной поверхности больше. Результаты первого и повторного измерения для разной ширины короткого канала приведены на рисунках 3.6-3.8.

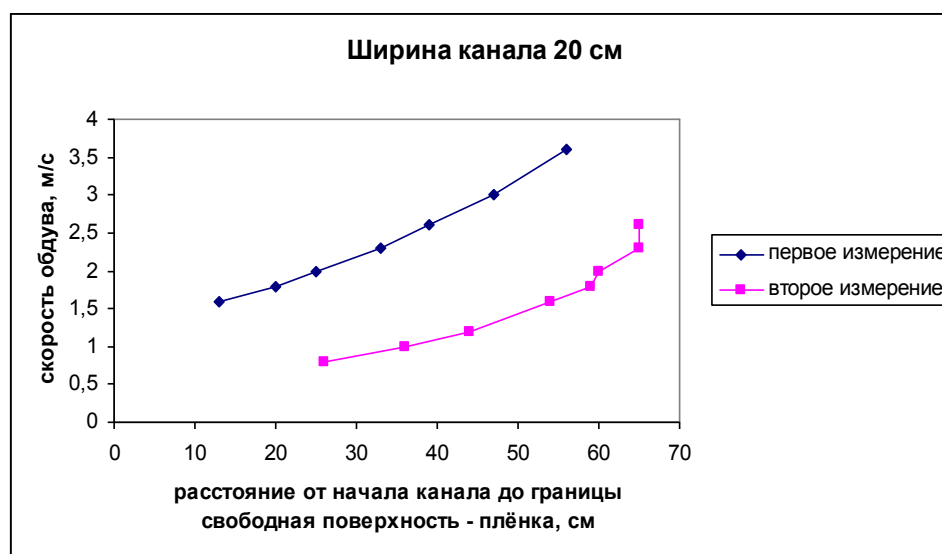
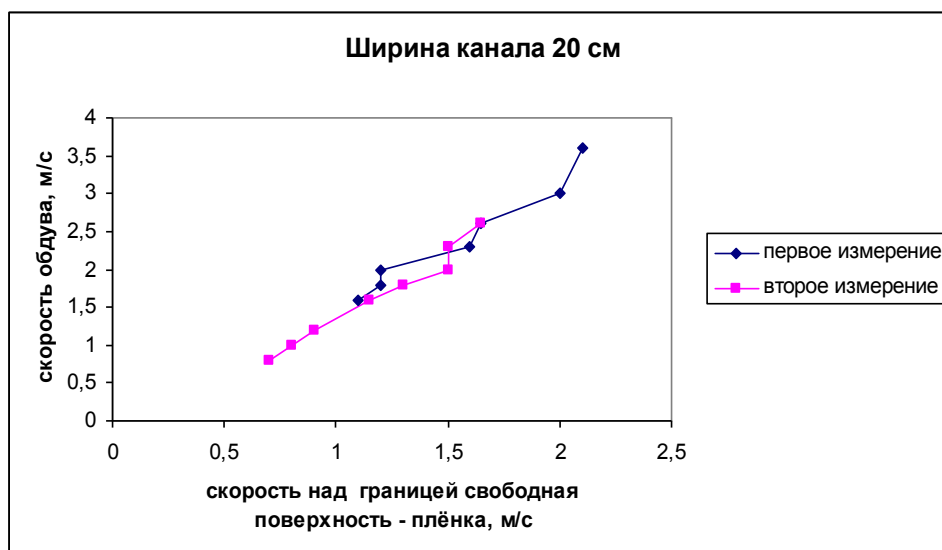


Рисунок 3.6. Взаимосвязь скорости ветра над границей свободная поверхность – плёнка и расстояния от начала канала до границы раздела свободная поверхность – плёнка со скоростью обдува в коротком канале шириной 20 см при первом и повторном измерении.

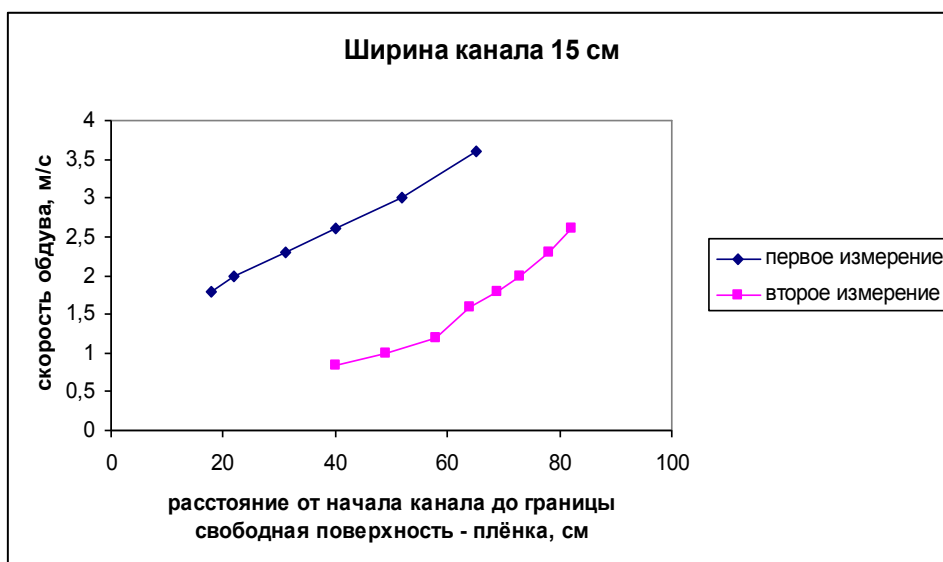
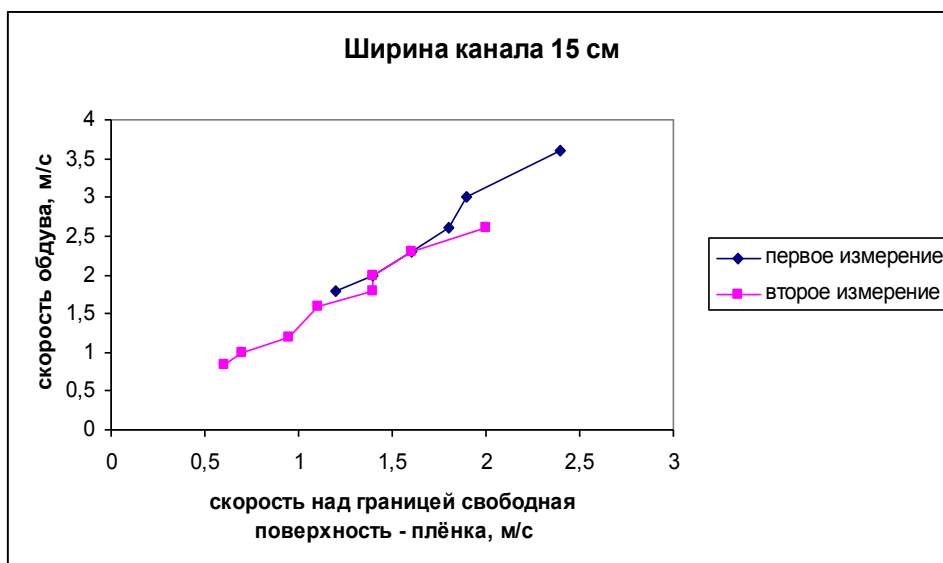


Рисунок 3.7. Взаимосвязь скорости ветра над границей свободная поверхность – плёнка и расстояния от начала канала до границы раздела свободная поверхность – плёнка со скоростью обдува в коротком канале шириной 15 см при первом и повторном измерении.

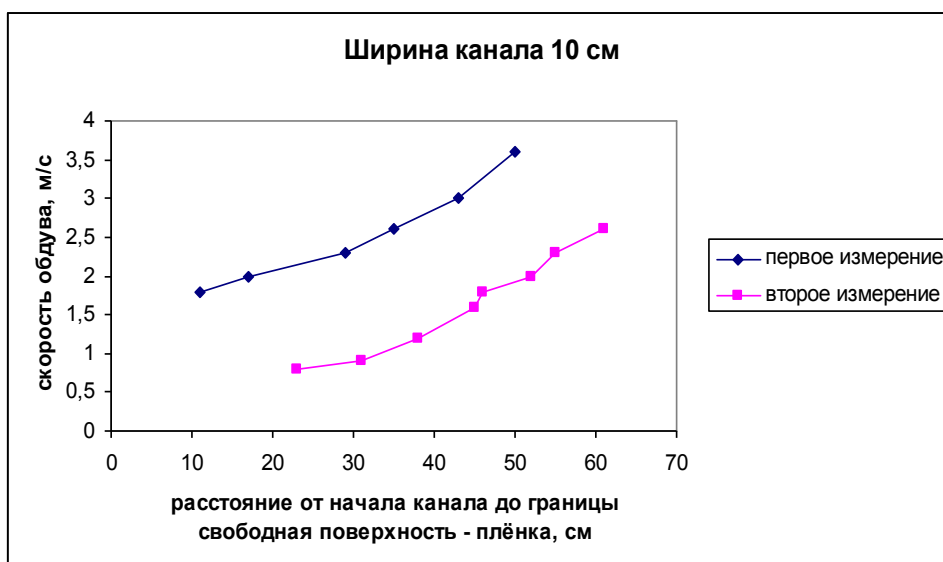
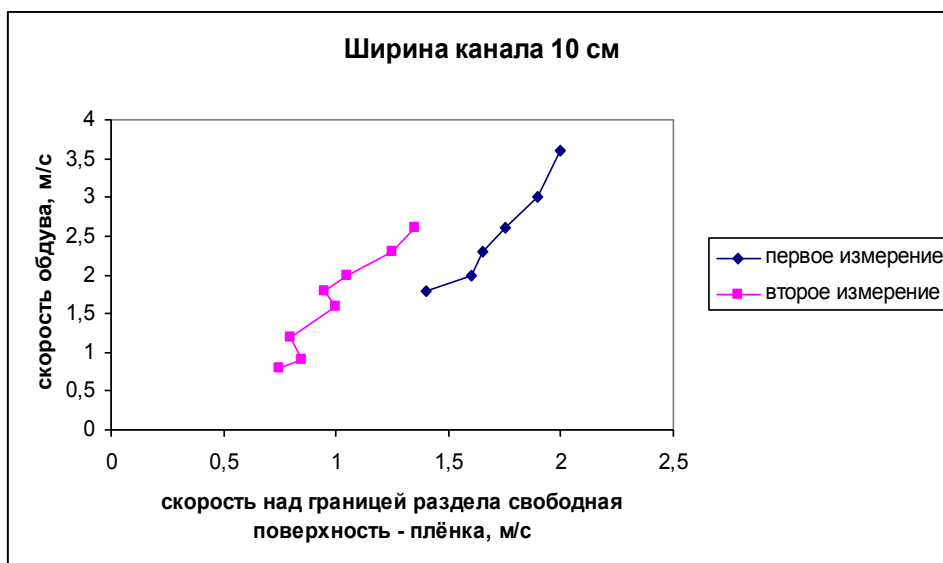


Рисунок 3.8. Взаимосвязь скорости ветра над границей свободная поверхность – плёнка и расстояния от начала канала до границы раздела свободная поверхность – плёнка со скоростью обдува в коротком канале шириной 10 см при первом и повторном измерении.

По нашим предположениям, такое изменение параметров, при которых происходит смена режимов движения поверхности, связано с тем, что под

действием ветра поверхность воды со временем очищается, и примеси поверхности и приповерхностного слоя сносятся в конец канала. Таким образом, при действии ветра меняется концентрация примесей в приповерхностном слое. Проводимые ранее нами исследования показали, что режимы движения свободной поверхности воды очень чувствительны к загрязнению поверхности [28]. В нашем случае дело связано не только с простым сдуванием нерастворимых примесей. Эксперименты по смахиванию верхнего слоя воды демонстрировали, что плёнка восстанавливается за время порядка секунды за счёт адсорбции из объёма, но, похоже, при длительном действии ветра очищается не только поверхность, но и прилегающий к поверхности объём. Требуется несколько часов перерыва, чтобы вернулись первоначальные значения скорости в канале. Процесс очищения наиболее очевиден при удалении верхнего слоя воды в зоне пленки – при этом граница раздела сдвигается ниже по течению. В то же время, этот процесс зависит от возвратного течения в объёме.

Таким образом, проведенные измерения показали наличие определенной «памяти» приповерхностного слоя в зависимости от того, каким образом менялась скорость ветра, а не только от поля скоростей ветра в данный момент времени. Такой вывод позволяет объяснить многочисленные различия в измерениях циркуляций Ленгмюра, даже для одного и того же водоема. Прочность пленки зависит не только от химического состава воды, который меняется с течением времени, но даже и от того, как менялся ветер в течение некоторого времени до проводимых измерений.

Интересно отметить, что при циркуляциях Ленгмюра наблюдается неравномерное распределение планктона в водоемах [8]. Здесь возникает сходное явление, но с учетом разницы в размерах. В данном случае речь идет об общем органическом углероде и солях, содержащихся в водопроводной воде. Их количества оказывается вполне достаточно для образования пленки. Даже

дистиляция не приводит к ее исчезновению пленки и только в деионизированной воде пленка исчезает [2, 28].

Усиление ветра приводило к тому, что пленка становилась все более концентрированной в зоне перехода.

3.2. Поле скорости в объеме воды вблизи поверхности.

Как уже говорилось выше, мы также измеряли поля скорости в воде вблизи поверхности с помощью метода цифровой трассерной визуализации и получали поле скорости в плоскости лазерного листа (см. рис. 3.9.)

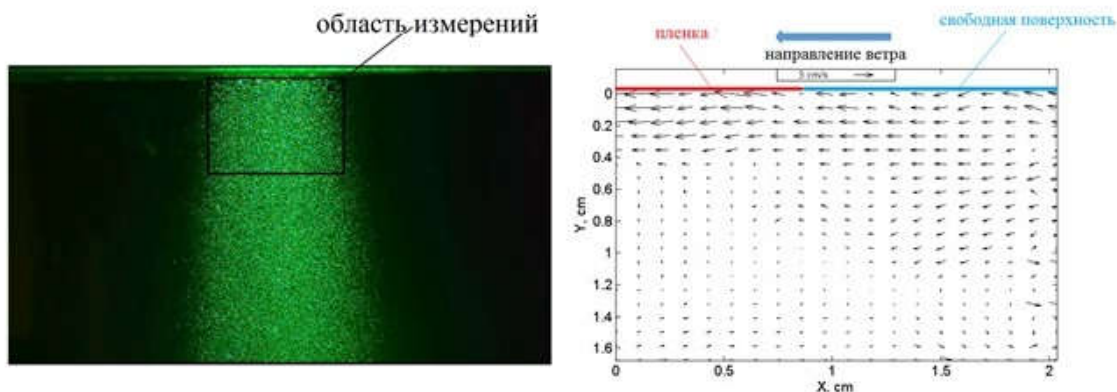


Рисунок 3.9. Фото частиц нейтральной плавучести в плоскости лазерного листа (слева) и пример получаемого методом цифровой трассерной визуализации векторного поля скорости в плоскости лазерного листа (справа)

Характерной особенностью такого поля скорости является то, что в районе границы раздела свободной поверхности и плёнки наблюдается «подныривание» под плёнку, что особенно хорошо видно на рисунке 3.10.

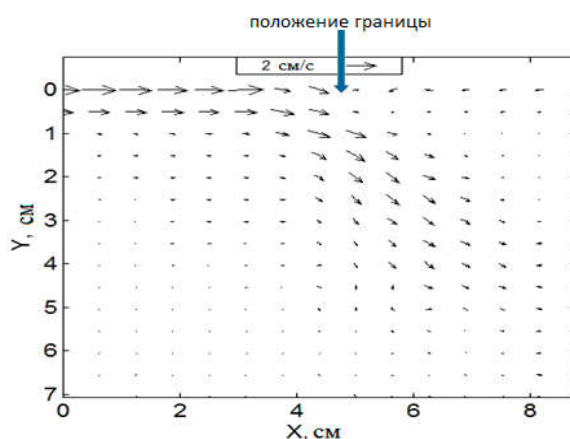


Рисунок 3.10. Поле скорости в длинном канале при скорости ветра 2,8 м/с

(Область вблизи границы раздела свободная поверхность – плёнка)

Самый верхний слой толщиной порядка миллиметра вблизи поверхности не разрешается методом цифровой трассерной визуализации из-за наличия мениска в воде и поверхностных оптических эффектов. Кроме того, несмотря на принятые меры по стабилизации течения, сохраняются определенные колебания свободной поверхности воды. Дополнительно мы также строили вертикальные профили скорости на различных расстояниях от границы свободная поверхность плёнка. Пример таких профилей можно увидеть на рисунке 3.11.

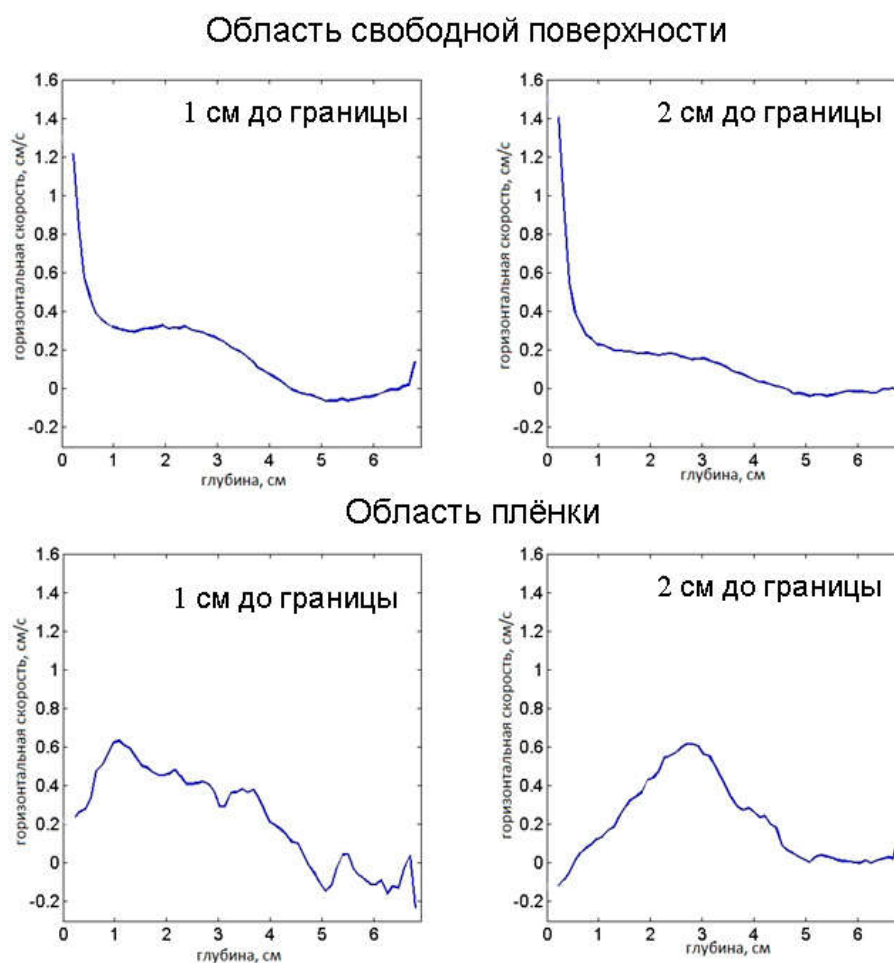


Рисунок 3.11. Вертикальные профили горизонтальной составляющей скорости в различных положениях от границы раздела свободная поверхность – плёнка, при скорости ветра 3,1 м/с в центре длинного канала.

Для таких профилей характерно, что в области свободной поверхности мы наблюдаем линейный профиль горизонтальной скорости и, хотя на самой поверхности мы его не разрешаем, мы хорошо видим его продолжение в более глубоких слоях и вблизи поверхности горизонтальная скорость имеет то же направление, что и ветер. Что касается профилей горизонтальной скорости в области плёнки, то там горизонтальная составляющая скорости вблизи поверхности часто меняет своё направление и бывает направлена как вдоль скорости ветра, так и против неё. Такая ситуация вполне объяснима и связана с тем, что в пленке, если она сохраняется, существуют достаточные

межмолекулярные силы, чтобы обеспечивать независимое движение. В частности, несмотря на то, что ветер дует в одном направлении, из-за уравнения непрерывности течения в пленке оказываются замкнутыми. Это значит, что существует как движение по ветру, так и против него. Наличие вязкости приводит к вовлечению в такое течение приповерхностных слоев.

3.3 Визуальное наблюдение полос, расположенных на поверхности параллельно скорости ветра, при механизмах конвекции, схожих с циркуляцией Ленгмюра.

Несмотря на то, что условия в лаборатории отличаются от натуральных и все возникающие течения ограничены стенками канала, мы с помощью тепловизора смогли наблюдать появление полос характерных для циркуляции Ленгмюра при скоростях ветра более 5,5 м/с (эта величина вполне соответствует натурным измерениям [8]). Эти полосы состояли из плёнки, которая собиралась в местах опускания воды, поскольку не тонула. В натуральных условиях на местах с плёнкой может собираться пена, водоросли, мусор и т.п. и делать полосы видными обычным глазом. Мы обнаружили, что пленка может скапливаться в местах опускания двумя путями. Первый путь - это когда после прорыва пленки часть её сносит на свободную поверхность (см. рисунок 3.12), а второй, когда плёнка достаточно крепкая (при добавлении в воду ПАВ, в нашем случае - SDS (додецилсульфат натрия)), она начинает рваться вдоль направления ветра, а циркуляция подобная циркуляции Ленгмюра сносит её в места опускания воды (см. рисунок 3.13).

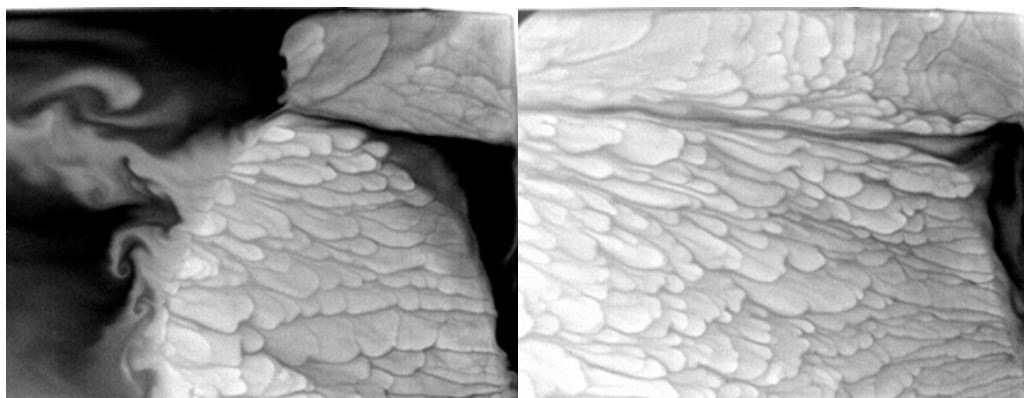


Рисунок 3.12. Пример образования линии из поверхностной плёнки при увеличении скорости ветра в длинном канале до 5,5 м/с. Направление ветра справа налево.

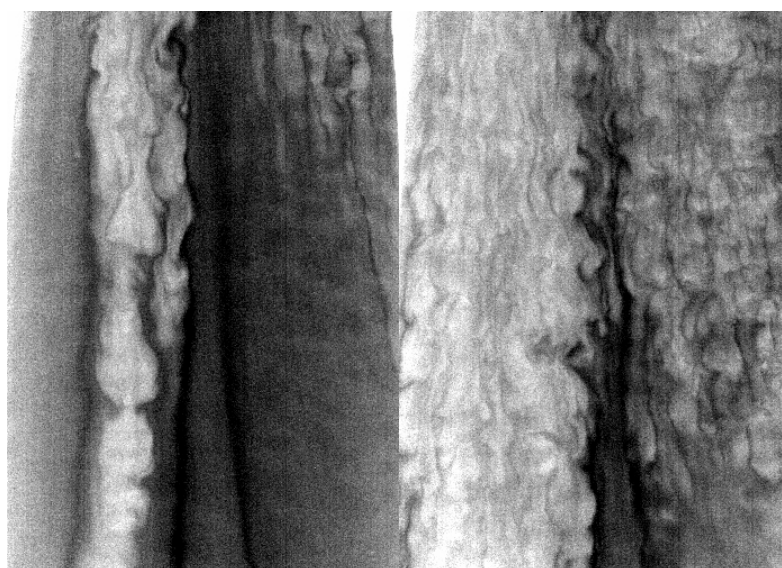


Рисунок 3.13. Пример образования линии из поверхностной плёнки с добавлением SDS при увеличении скорости ветра в коротком канале до 5,9 м/с. Направление ветра снизу вверх.

Вторая картинка получилась при добавлении в воду нерастворимой примеси SDS в концентрации примерно 0,01 от ККМ (Критическая концентрация мицеллообразования), но и этого оказалось достаточно, чтоб плёнка стала

прочнее и порвалась только при скорости 5,9 м/с, причем вдоль, а не поперек потока. (ККМ для SDS составляет $8 \cdot 10^{-3}$ моль/л)

ВЫВОДЫ

По результатам нашей работы были сделаны следующие выводы.

1. При увеличении скорости ветра возникает разрыв поверхностной пленки и два типа поверхности – с пленкой и без нее. В натуральных условиях это может приводить к скапливанию поверхностных загрязнений на границах раздела и позволяет визуализировать циркуляцию Ленгмюра.
2. Измерения с помощью ИК - термографии и цифровой трассерной визуализации подтверждают гипотезу о том, что плёнка движется только в горизонтальной плоскости при наличии ветра, что приводит к сложной структуре приповерхностного течения в случае, если пленка на поверхности сохраняется, несмотря на то, что направление ветра задано.
3. Конвективные течения имеют различный характер при наличии свободной плёнки и без неё. При столкновении с плёнкой со стороны свободной поверхности наблюдается подныривание верхнего слоя под плёнку. На участке со свободной поверхностью характерен линейный профиль горизонтальной составляющей скорости вблизи поверхности.
4. Проведенные измерения показали наличие определенной «памяти» приповерхностного слоя. Постепенная очистка или загрязнение не только поверхности, но и приповерхностного слоя при наличии ветра приводит к достаточно долгому сохранению неоднородности приповерхностных слоев.
5. В лабораторных условиях полосы, аналогичные возникающим при циркуляции Ленгмюра, можно наблюдать при скорости ветра выше 5,5 м/с в обычной водопроводной воде, и выше 5,9 м/с при добавлении SDS в концентрации 0,01 ККМ. Такие скорости полностью соответствуют

экспериментально наблюдаемым в натурных измерениях, несмотря на разницу в граничных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В заключении мне бы хотелось поблагодарить своего научного руководителя Плаксину Юлию Юрьевну за предоставленную возможность провести интересную исследовательскую работу и большую помощь в её реализации, Винниченко Николая Аркадьевича за его программу и консультации по его использованию и Уварова Александра Викторовича за совместные обсуждения результатов работы. Также хочу поблагодарить Мельникову Ольгу Николаевну за предоставленный бассейн с длинным каналом, необходимый для проведения нашей работы и помощь в постановке эксперимента на нём.

Работа была выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоздат, 1988, 304 с.
2. Плаксина Ю.Ю., Пуштаев А.В., Винниченко Н.А., Уваров А.В. Влияние малых примесей на формирование структур при конвекции Рэля-Бенара-Марангони в плоском слое жидкости // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 2018, № 5, с. 56–62, 2018.
3. Leibovich V. S. The form and dynamics of langmuir circulations // Fluid Mech, 1983, p. 391–427.
4. Блохина Н.С., Орданович А.Е. Влияние загрязнений поверхности воды нефтепродуктами на формирование циркуляций Ленгмюра и энергообмен между водоемом и атмосферой // Вестник Московского университета, Сер. 3, Физика. Астрономия, 1997, с. 52-55.
5. Блохина Н.С., Орданович А.Е. Влияние поверхностных загрязнений на процессы конвективного перемешивания в верхнем слое водоема // Вестник Московского университета, Сер. 3, Физика. Астрономия, 1998, с. 27-29.
6. Блохина Н.С., Орданович А.Е. Влияние гидрометеорологических условий и поверхностных загрязнений на параметры циркуляций Ленгмюра // В кн. «Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами». Под редакцией Н.Н. Филатова. Карельский научный центр РАН, Институт водных проблем севера, 2000, с. 381-392.
7. Filatov N.N., Ryanzhin S.V. and Zaitsev L.V. Investigations of turbulence and Langmuir circulations in Lake Ladoga // J. Great Lakes Res, 1981, 7:1-6.
8. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер // Том 1. Гидрофизика. М.: Физический факультет МГУ, 2002, с. 144-152.

9. Leibovich B. S. On the evolution of the system of wind drift currents in the ocean and Langmuir circulations. Part 1. Theory and averaged current. 1977, p. 715-743.
10. Melnikova O.N., Pokazeev K.V. Estimation of Water-Surface Deformation by Vortices in a Viscous Horizontally Decelerating Air Flow // Department of Physics, Moscow State University, 2016, c. 326-328.
11. Veron F., Melville W. K. and Lenain L. The Effects of Small-Scale Turbulence on AirSea Heat Flux // Journal of Physical Oceanography, 2011, p. 205-220.
12. Melville W. K. The role of surface wave breaking in air-sea interaction. // Annu. Rev. Fluid Mech., 1996, v. 28, p. 279-321.
13. Langmuir I. Surface Motion of Water Induced By Wind. // Science, 1938, v. 187, N 2250, p. 119-123.
14. Thrope S. Langmuir Circulation // Annual Review of Fluid Mechanics, 2004, v. 36, p. 55-79.
15. Weller R. A., Dean J.P., Price J.F., Francis E.A., Marra J. and Boardman D.C. Three-Dimensional Flow in the Upper Ocean // Science, 1985, v. 227, p. 1552-1556.
16. Weller R. A. and Price J.F. Langmuir circulation within the oceanic mixed layer // Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers, 1988, v.35, p. 711-747.
17. Smith J. A. Observed growth of Langmuir circulation // Journal of Geophysical Research: Oceans, 1992, v. 97, p. 5651-5664.
18. Craik A. D. D. The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism // Journal of Fluid Mechanics, 1977, v.81, p. 209-223.
19. Leibovich S. The form and dynamics of Langmuir circulations // Ann. Rev. Fluid. Mech, 1983, p. 391– 427.
20. Schimpf U., Hauecker H. and Jhne B. Measurements of Air-Sea Gas Transfer using Active and Passive Thermography // Interdisciplinary Center for Scientific Computing, 1999, p. 1-6.
21. Doney S. C. Irreversible thermodynamics and air-sea exchange // Journal of Geophysical Research, 1995, v. 100, p. 8541–8553.

22. Melville W. K., Shear R., and Veron F. Laboratory measurements of the generation and evolution of Langmuir circulations // *Journal Of Fluid Mechanics*, 1998, v. 364, p. 31–58.
23. Melville W.K., Veron F. Pulse-to-Pulse Coherent Doppler Measurements of Waves and Turbulence // *American Meteorological Society*, 1999, p. 1580-1596.
24. Veron F. and Melville W.K. Experiments on the stability and transition of wind-driven water surfaces // *Journal Of Fluid Mechanics*, 2001, v. 446, p. 25-65.
25. Kenney B. C. Observations of coherent bands of algae in a surface shear layer // *Limnology and Oceanography*, 1993, v. 38, № 5, p. 1059–1067.
26. Veron F., Melville W.K. and Lenain L. Infrared techniques for measuring ocean surface processes // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, v. 25, № 2 p. 307-326.
27. Vinnichenko N. A., Uvarov A. V., Plaksina Yu Yu. Combined study of heat exchange near the liquid–gas interface by means of background oriented schlieren and infrared thermal imaging // *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, v. 59, p. 238–245.
28. Сухарев Д.А. Влияние малых примесей на поверхностные свойства воды и водных растворов. // *Международный молодежный форум "Ломоносов-2018"*, секция "Физика", 2018, с. 417-418.