

УДК 532.59:551.466.3

ВЛИЯНИЕ СЛАБОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЕНКИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В КАНАЛЕ

© 2023 г. Ю. Ю. Плаксина^а, * , А. В. Пуштаев^а, Н. А. Винниченко^а, А. В. Уваров^а

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

*e-mail: yuplaksina@mail.ru

Поступила в редакцию 20.02.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Процессы зарождения ветровых волн, несмотря на многочисленные исследования, остаются плохо изученными. Одна из основных причин, по мнению авторов, состоит в упрощенном теоретическом анализе, не учитывающем слабую пленку естественных примесей. В работе проведено экспериментальное исследование и сравнение генерации волн в двух ветровых каналах в этаноле, воде и воде с добавлением растворимого поверхностно-активного вещества – додецилсульфата натрия (SDS) в разных концентрациях. Используемые в работе концентрации очень слабо меняют коэффициент поверхностного натяжения, но существенно меняют структуру приповерхностных течений. В этаноле холодная пленка не образуется, и он может рассматриваться как базовый пример. В воде и воде с добавлением ПАВ пленка рвется при определенной критической скорости обдува (увеличивающейся при увеличении концентрации ПАВ) и происходит очистка поверхности. Но, для того, чтобы поверхность оставалась чистой, адсорбция примесей на поверхности должна компенсироваться их удалением сдвиговыми напряжениями. В работе используются три экспериментальные методики для исследования влияния холодной пленки на образование ветровых волн. Для определения рельефа поверхности в работе использовался модифицированный цветной шпирен-метод, для определения поля скорости в жидкости – метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Поля температуры поверхности, которые позволяют идентифицировать области разрыва холодной пленки, измерялись с помощью инфракрасной термографии поверхности. Также с помощью термографии исследовалось поле скорости на поверхности (ИК PIV). Показано, что пленка оказывает существенное влияние как на амплитуду волн, так и на структуру приповерхностного течения.

Ключевые слова: поверхностная пленка, ветровые волны, PIV, ИК-термография, цветной шпирен-метод

DOI: 10.31857/S0002351523050097, **EDN:** PLOWBA

1. ВВЕДЕНИЕ

Влияние ветра на формирование волн и перемешивание является важнейшей проблемой геофизики [Монин и др., 1965; Голицын, 2013]. Лабораторные исследования в ветровых каналах широко распространены, несмотря на очевидные трудности сопоставления с натурными наблюдениями. При лабораторных измерениях широко используются как традиционные контактные методы (трубки Пито, анемометры и др.), так и целый ряд современных методов, которые применяются как в натуральных, так и лабораторных условиях (лазерная доплеровская анемометрия, стереосъемка поверхности, ИК-термография и др.). Но лабо-

раторные условия позволяют использовать современные методы получения полей скорости и температуры, которые трудно реализовать в натуральных условиях, такие как метод цифровой трассерной визуализации (PIV) [Кандауров и др., 2014], инфракрасную термографию поверхности высокого разрешения [Veron et al., 2001], лазерно-индуцированную флуориметрию (LIF) [Yousefi et al., 2021], лазерные методы определения рельефа поверхности [Zavadsky et al., 2017a]. Эти методы выводят исследования в ветровых каналах на новый уровень развития.

В работе рассматривается зарождение и развитие волн при слабом ветре в условиях, когда существенную роль играет холодная пленка. Эта пленка хорошо известна [Schlussel et al, 1990; Федоров и др., 1988], но в геофизике она связывается, как правило, только с процессами теплообмена, а именно, с занулением вертикальной компо-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

ненты скорости у поверхности и переходом на молекулярный механизм теплопереноса. Следует отметить работу [Kudryavtsev et al., 2008], где обсуждается вопрос об определении шероховатости в погранслое в связи с тем, что при росте амплитуды шероховатости не может сохраняться молекулярный теплообмен в приповерхностном слое. В задаче тепло- и массообмена при наличии свободной поверхности важнейшим является вопрос о том, происходит или нет всплытие жидкости на поверхность. Можно показать, что в воде, если только она не деионизированная, обновление поверхности не происходит до достижения некоторых предельных напряжений либо за счет интенсификации теплообмена при нагреве, либо за счет обдува [Vinnichenko et al., 2018]. Это означает, что холодная пленка существенно влияет на гидродинамические свойства поверхностных течений. Проблема граничных условий на поверхности воды хорошо известна в гидродинамике. Причины, по которым воздушные пузырьки или капли движутся в жидкости в соответствии с формулой Стокса, с прилипанием на границе раздела “жидкость–воздух” или “жидкость–жидкость”, а не в соответствии с формулой Адамара–Рыбчинского, обсуждаются уже более 100 лет. В настоящее время хорошо известно, что переход к деионизированной воде и меры по очистке газов, подводных трубок и емкостей приводят к изменению граничных условий и увеличению скорости всплытия в полтора раза [Pawliszak et al., 2019]. Пленка блокирует конвекцию Марангони и по этой причине исследования термокапиллярной конвекции выполняются только в определенных жидкостях (силиконовое масло, ацетон, этиловый, метиловый, изопропиловый спирты и др.). В этих жидкостях на свободной границе выполняются классические условия проскальзывания (с учетом капиллярных сил – условия Пирсона). К похожим выводам приходят и авторы классической монографии по приповерхностному слою [Федоров и др., 1988], где на основании наблюдений конвективного движения в тонких слоях этанола и воды (когда термогравитационный механизм не играет существенной роли) был сделан вывод о блокировке конвекции Марангони в воде примесями и о наличии такого типа конвекции в этаноле. Исследования поверхности этанола при обдуве проводились в работе [Реутов и др., 2007]. Было показано, что в небольшом объеме (20 на 30 см, глубина 0.5 см) при обдуве возникают длинные полосы на рельефе поверхности, напоминающие циркуляции Ленгмюра. Можно добавить, что в воде в малом сосуде пленку не удастся разорвать до очень больших скоростей обдува. Пленка вращается и поверхностная дивергенция скорости равна нулю [Vinnichenko et al., 2018]. Обратное движение поверхности против ветра можно наблюдать достаточно просто, например, с применением засева. Стандартный баланс напря-

жений на поверхности, который сводится (с некоторыми оговорками, связанными с процессами турбулизации и волнами) к равенству напряжений для воздуха и воды, при обратном движении поверхности оказывается неприменим. Необходимо учитывать напряжения в самой пленке, которые и приводят к возникновению противоположной по знаку суммарной силы. Пленка создает завихрения, которые турбулизуют поток в жидкости даже без “традиционного” фактора, связанного с турбулизацией потока в воздухе. Таким образом, в теориях зарождения волн, развиваемых на основе [Miles, 1957; Phillips, 1957], необходимо учитывать влияние пленки.

Холодная пленка, в отличие от загрязнений, является существенно более слабой и практически не препятствует появлению касательных сдвигов, то есть образованию поверхностных вихрей (закрутка поверхности). В исследованиях этого типа вихрей приоритет принадлежит работе [Черноусько и др., 1971], что неоднократно отмечалось в литературе [Katsaros et al., 1977]. Но при отсутствии завихрений (например, при линейном нагреве) пленка ведет себя как твердая поверхность [Rudenko et al., 2022]. Термография высокого разрешения позволяет в ряде случаев (но далеко не всегда) фиксировать разрывы пленки [Yousefi et al., 2021; Kou et al., 2011]. Несмотря на то, что в настоящее время тепловизоры не так часто используются для исследований в ветровых каналах, за такими исследованиями большое будущее, потому что данные по параметрам пленки, скорости дрейфа и структуре конвективных ячеек дают очень много информации для исследования ветрового волнения и теплообмена на границе раздела сред. Можно указать также на работу [Vegon et al., 2011], где приводятся результаты натурных экспериментов по исследованию движения тепловых маркеров, создаваемых CO₂-лазером. По приведенным в работе иллюстрациям хорошо видно, что за время порядка секунды поверхность смещается очень существенно, но размер маркеров и их положение в системе конвективных вихрей практически не меняется. Отметим, что для свободной поверхности разлет теплового маркера происходит за десятки доли секунды за счет конвекции Марангони. Большие “времена жизни” тепловых неоднородностей на поверхности воды реализуются только при наличии пленки [Vinnichenko et al., 2018].

Очень важным свойством пленки является ее быстрое восстановление из объема за счет адсорбции. Нерастворимые примеси, конечно, удобны для экспериментального и теоретического анализа, но не они определяют “живучесть” холодной пленки. В данной работе влияние растворимых примесей было исследовано с помощью добавок небольших количеств растворимых поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые не приводят к видимым изменениям свойств во-

ды и очень слабо меняют коэффициент поверхностного натяжения (КПН), но их влияние на структуру поверхностного течения при обдуве является определяющим. Влияние ПАВ на ветровые волны давно исследуется (см., например, [Монин и др., 1985]). Концентрации примесей, обычно используемые в таких исследованиях, существенно выше используемых в данной работе. В нашем случае даже примесей, присутствующих в дистиллированной воде, оказывается достаточно, чтобы образовать пленку.

Исследование образования волн при малых скоростях ветра затрудняется тем, что скорости дрейфа невелики и они плохо фиксируются “классическими” методами. Кроме того, такие исследования, как будет продемонстрировано, дают очень большой разброс результатов, в зависимости от того, в каком месте течения проводятся измерения, потому что движение пленки может полностью менять картину течения на поверхности. Термографические наблюдения, в сочетании с PIV, позволяют понять все особенности этих явлений.

Очевидно, что одной из базовых характеристик ветрового волнения является рельеф поверхности. Локальные измерения профиля волн связаны с измерением уровня жидкости или с использованием лазерных методов измерения наклона поверхности. В то же время, очень большой интерес представляет измерение “мгновенной” формы участка свободной поверхности. Стандартным методом является стереосъемка, реализуемая как в натурных условиях [Benetazzo et al., 2012], так и в лабораторных измерениях [Zavadsky et al., 2017b]. Для этого метода очевидны трудности с точностью измерения, особенно для коротких волн [Kosnik et al., 2011]. В лабораторных условиях форму поверхности можно определять из анализа видимого смещения точек фона, используя отраженное [Vinnichenko et al., 2020] или преломленное поверхностью изображение [Moisy et al., 2009]. Но такие измерения сильно ограничены по амплитуде (величиной примерно 1 мм). В данной работе используется новый метод измерений, основанный на использовании цветного шпирен-метода [Zhang et al., 1994] с некоторыми модификациями. Метод позволяет с хорошим разрешением по пространству получить мгновенный рельеф поверхности на достаточно большой площади. В работе измерения выполнены для участков длиной 25 и 35 см с полной шириной ветровых каналов с интервалом по времени в десятые доли секунды. Измерения PIV чаще выполняются для воздуха, несмотря на трудности с засевом частиц и необходимостью использования мощных лазеров и малых времен экспозиции из-за больших скоростей в воздухе [Кандауров и др., 2014; Yousefi et al., 2021]. Но значительное число работ посвящено исследованию поля скорости в воде, а также в воде и воздухе одновременно [Banner et al., 1998;

Siddiqui et al., 2007]. В воде эти измерения осложняются влиянием волнового движения. Более подробно вопрос будет рассмотрен в соответствующем разделе статьи.

Как уже отмечалось, из-за наличия подвижной пленки задачу зарождения волн моделировать довольно трудно. Модели образования ветровых волн, безусловно, существуют в очень большом количестве, начиная с базовых простых моделей потери устойчивости ([Miles, 1957, Phillips, 1957], см. также обзор [Li et al., 2022]). В настоящее время исследования нелинейного взаимодействия “ветер-волна” проводятся как в рамках инженерных моделей TOGA COARE, так и на основе современных эмпирических моделей турбулентности, в частности, с помощью метода крупных вихрей (LES), который наиболее перспективен для таких задач, но требует серьезных вычислительных ресурсов (см, например, обзор [Deskos et al., 2021]). С точки зрения теоретического анализа влияния слабого ветра отметим работу [Дружинин, 2021], где проводилось прямое моделирование (DNS) генерации волн. Эта работа развивает известное решение Лэмба [Ламб, 1947] для нестационарного течения, вызванного постоянным касательным напряжением. Следует отметить, что глубина канала в наших исследованиях невелика и из-за сильных возмущений в начале бассейна установление стационарного профиля происходит очень быстро, гораздо быстрее, чем предсказывает “диффузионное” решение Лэмба и расчеты [Дружинин, 2021] с малыми возмущениями. Образующееся стационарное состояние течения (точнее, квазистационарное, колебания потока присутствуют) в канале при его обдуве и будет рассматриваться.

Таким образом, предложенное в работе сочетание экспериментальных методов позволяет проанализировать наличие пленки, амплитуду волн и поле скоростей под поверхностью, что позволяет продемонстрировать огромное влияние холодной пленки на формирование волн, турбулизацию поверхности, структуру подповерхностного течения, баланс напряжений на границе раздела сред.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе для получения двумерных полей рельефа поверхности жидкости использовался бесконтактный оптический метод цветной кодировки наклона (Color Imaging Slope Gauge), предложенный в работе [Zhang et al., 1994]. В основе метода лежит принцип получения информации о величине наклона в каждой точке поверхности по спектральному составу (цвету) и интенсивности излучения, регистрируемого цифровой камерой, после преломления (отражения) в данной точке поверхности. В терминологии, используемой в области компьютерного зрения, данный

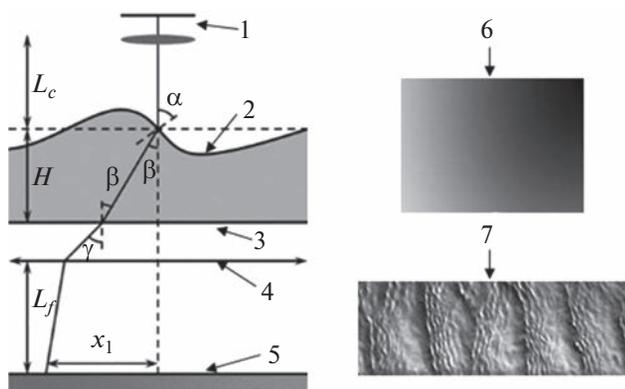


Рис. 1. Схема модифицированного цветного шлирен-метода. 1 – камера, 2 – поверхность, 3 – дно канала, 4 – линза Френеля, 5, 6 – цветной экран, 7 – пример снимка экрана сквозь возмущенную поверхность воды.

метод относится к категории методов определения формы по оттенку (shape-from-shading technique) [Jähne et al., 1994]. С другой стороны, оптическая схема метода фактически эквивалентна схеме цветного шлирена, в котором цветной фильтр помещен в передней плоскости (dissectional color Schlieren) [Zhang et al., 1996]. Схема, в которой используется преломление света, является более предпочтительной, чем схема с использованием отражения, поскольку в этом случае существенно выше яркость регистрируемого изображения и можно измерять большие углы наклона [Jähne et al., 1994]. Оптическая схема используемого метода (мы его будем называть модифицированным цветным шлирен-методом) представлена на рис. 1. В самом низу расположен подсвечиваемый цветной экран. В нашем случае его роль играл ЖК монитор (1280 × 1024 пикс.). На нем демонстрировалось изображение с градиентом цвета по горизонтали (красный) и вертикали (синий). Это позволяет кодировать обе компоненты вектора нормали к поверхности. На расстоянии $L_f = 42$ см от экрана располагалась линза Френеля (27 × 20 см, фокусное расстояние $f = 33$ см). Линза вплотную примыкала к дну канала с жидкостью, глубиной $H = 4$ см. Изображение поверхности жидкости регистрировалось цифровой зеркальной камерой Canon EOS 700D с объективом Canon EF 75–300 mm, расположенной на расстоянии $L_c = 170$ см. Съемка велась в режиме видео (30 кадров в секунду) с выдержкой 1/640 с. Линза Френеля формирует изображение экрана приблизительно в той точке, где находится камера. В результате образуются пучки лучей одного цвета, сходющиеся во входной зрачок камеры, с разным наклоном по отношению к главной оптической оси системы. Используя закон преломления, можно показать, что координата x_1 луча на экране, которая однозначно определяется цветом точки, из которой выходит луч, согласно заданному

изображению на мониторе, связана с величиной локального градиента высоты поверхности h :

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \operatorname{tg} \alpha, \quad x_1 \approx L_f \operatorname{tg} \gamma, \quad (1)$$

$$\sin \gamma = n \sin \beta = \sin \alpha \left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha \right),$$

где n – показатель преломления жидкости. Соответствие цвета, выводимого на монитор, и цвета, регистрируемого с помощью камеры, определялось путем последовательной съемки набора одноцветных изображений и получения с помощью линейной интерполяции соответствующей зависимости. Таким образом, регистрируя цвет в каждой точке, можно определить величину локального наклона поверхности. В процессе обработки полученных изображений дополнительно вносилась поправка, учитывающая неоднородность цвета, которая имела место при отсутствии волн (для плоской поверхности). После определения поля $\operatorname{grad} h = \{h_x, h_y\}$ поле высоты затем вычислялось с помощью Фурье-преобразования [Zhang et al., 1994]:

$$\hat{h} = \frac{-ik_x \hat{h}_x - ik_y \hat{h}_y}{k^2}, \quad (2)$$

где \hat{h} – фурье-образ функции $h(x, y)$, $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ – квадрат модуля волнового вектора.

В случае канала большего размера глубиной 30 см, где невозможно было положить экран с фоном под дно, экран и линза Френеля ставились параллельно боковой стенке, а на дно канала и над его поверхностью устанавливалась система из двух зеркал. Тестирование данного метода проводилось с помощью поверхности известной формы (линзы), которое показало хорошее соответствие измеренного рельефа и формы линзы. Если сравнивать данный метод с измерением отклонения лазерного луча [Zavadsky et al., 2017a], то можно сказать, что за счет цветовой кодировки удается одновременно измерить отклонение лучей не в одной точке, а в очень большом числе точек.

Для построения полей скорости в вертикальной плоскости нами использовался метод PIV [Raffel et al., 2018]. Суть метода состоит в том, что прозрачная жидкость засеивается частицами нейтральной плавучести (полюе стеклянные сферы диаметром до 10 мкм) и подсвечивается лазерным лучом, развернутым в плоскость с помощью цилиндрической линзы. Далее частицы в плоскости лазерного листа фотографируются на камеру, с некоторым временным интервалом, и затем с помощью кросс-корреляционной обработки полученных изображений [Keane et al., 1992] находят поле смещений частиц и поле скорости. Важно отметить отличие этого метода от съемки с длинной выдержкой, часто используемой в простых измерениях, в которых скорость определяется по длине треков. Кросс-корреляционный метод на-

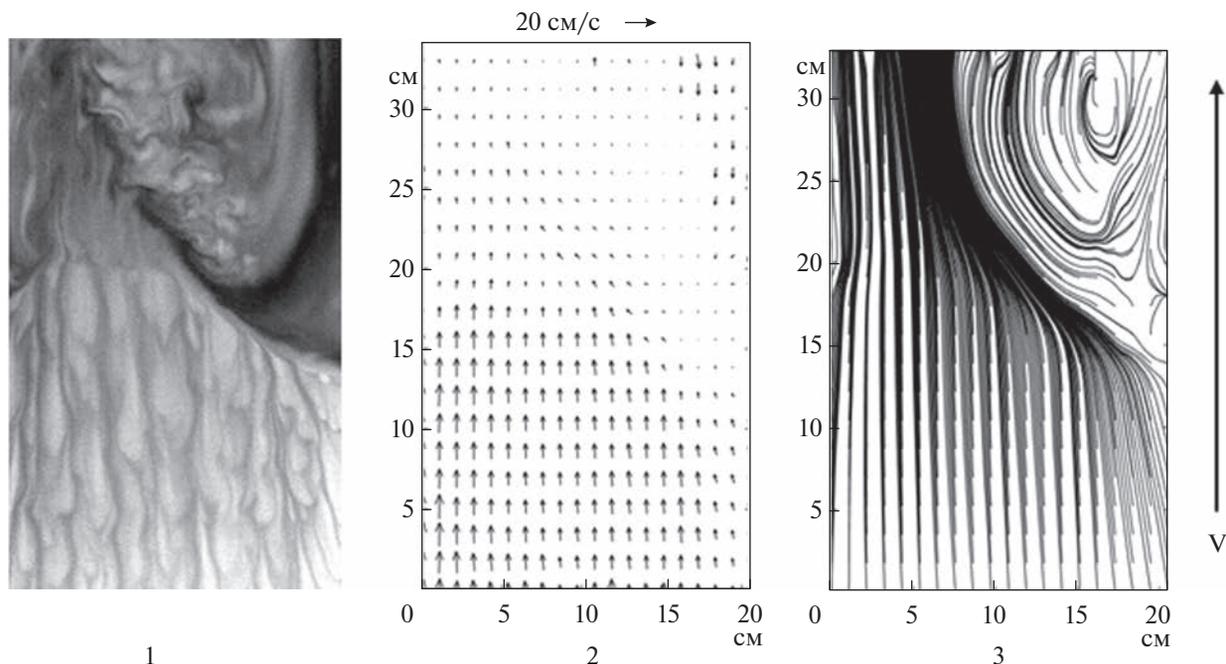


Рис. 2. Термическая структура поверхности воды, обдуваемой со скоростью 2.37 м/с (направление обдува снизу вверх). Нижняя часть рисунка находится на расстоянии 24 см от начала канала. 1 – ИК снимок обдуваемой поверхности (чем темнее цвет, тем холоднее поверхность), 2 – поле скорости, 3 – линии тока.

много точнее и имеет большее пространственное разрешение, но требует съемки с малым интервалом между кадрами и хорошего освещения. Из-за малой скорости течения в воде оказалось достаточно использование видеокамеры со скоростью съемки 500 кадров/с и двух непрерывных зеленых лазеров с мощностью по 1 Вт с наложением лазерных листов. В отличие от стандартной схемы, лазерный лист заводится снизу через зеркало, чтобы уменьшить влияние отражений.

Для измерения полей температуры поверхности жидкости использовался метод ИК-термографии с применением тепловизора FLIR SC 7700, работающего в диапазоне длин волн 3.7–4.8 мкм, с разрешением матрицы 640×512 пикселей. Нас прежде всего интересовали не столько абсолютные значения температуры, сколько термические структуры на поверхности жидкости, по которым можно было определить присутствие пленки. Разность температур, фиксируемая данным тепловизором, составляет сотые доли градуса, и структуры хорошо видны. В отсутствии пленки обычно наблюдается всплытие более теплой жидкости из объема на поверхность. Когда на поверхности присутствует пленка, то она мешает теплой жидкости выходить на поверхность и теплообмен затруднен – температура пленки ниже, чем на свободных участках поверхности. На рис. 2. приведен пример ИК-снимка, где сверху пленка, а снизу – свободная поверхность. На этом же рисунке приводится расчет поля скорости и линий тока с помощью модификации метода PIV с использо-

ванием неоднородностей температурного поля, который в последние годы часто используется [Kudryavtsev et al., 2008]). На рисунке хорошо видна закрутка течения в местах образования пленки.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛН В ВОДЕ И ЭТАНОЛЕ

Из ранее проведенных исследований [Плаксина и др., 2018] известно, что в этаноле, в отличие от воды, реализуются граничные условия свободной поверхности и отсутствует пленка. В воде под действием ветра пленка может рваться и смещаться. Сравнительный анализ “вода-этанол” хорошо иллюстрирует влияние пленки. Для этих измерений использовались вентилятор с регулируемой мощностью и ветровой канал размером $80 \times 10 \times 10$ см с уровнем жидкости 4 см (канал 1). Во всех каналах проводились измерения поля скорости в разных сечениях в воздухе с помощью стандартных анемометров. Градиент скорости существенно уменьшается на высоте порядка 15 мм и именно на этой высоте приводятся все данные по скорости обдува. При необходимости делается пересчет для стандартного логарифмического профиля для сравнения результатов с другими авторами.

Полученные с помощью метода PIV поля скорости показали, что у этанола максимальная скорость жидкости наблюдается на поверхности и направлена в сторону ветра, а у воды скорость на поверхности может быть направлена произвольным образом. Там же, где поверхность воды осво-

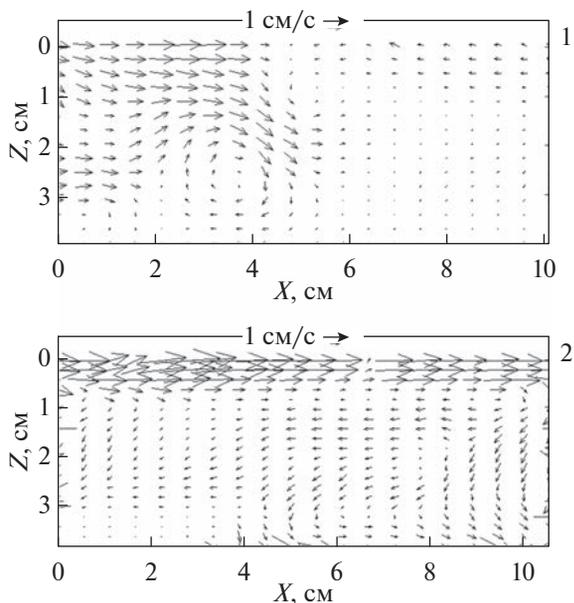


Рис. 3. Поля скорости в вертикальном сечении в середине ветрового канала 1 при скорости ветра 1.7 м/с 1 – в воде, 2 – в этаноле.

бодилась от пленки, скорость (как и в этаноле) выстраивается по ветру. На рис. 3 приведен пример полей скорости в воде (вверху) и в этаноле (внизу) при скорости ветра 1.7 м/с, когда в наблюдаемой области в воде часть поверхности слева свободна, а часть поверхности справа находится под пленкой (см. рис. 2а). Как видно из рисунка,

на месте границы “свободная поверхность – пленка” происходит подныривание потока под поверхность, а скорости на поверхности в пленке сильно отличаются от скоростей на свободной поверхности. В этаноле же везде наблюдается свободная поверхность и движение поверхности по ветру.

На расстоянии 32.5 см от начала ветрового канала были сняты мгновенные поля рельефа поверхности, примеры которых изображены на рис. 4.

Наиболее удобной интегральной характеристикой рельефа поверхности является среднеквадратичное отклонение поверхности от нулевого уровня (см, например, [6]). Полученные зависимости среднеквадратичного отклонения от скорости обдува для воды и этанола показаны на рис. 5.

Следует отметить, что графики на рис. 5 получены усреднением по всему измеряемому полю (25 на 8 см) в каждый момент времени, с последующим усреднением по времени серии (на интервале 10 с с частотой 30 Гц). Средние в разных сериях отличаются не более, чем на 0.16 мм для воды и 0.32 мм для этанола. Как видно из рис. 5, зависимость для воды при скорости 1.8 м/с меняет угол наклона, как раз в этой точке и происходит переход с поверхности под пленкой к состоянию со свободной поверхностью. Что касается этанола, то у него среднеквадратичное отклонение поверхности изначально растет быстрее с увеличением скорости обдува, чем у воды. Интересно отметить, что в монографии [Федоров и др., 1988] именно диапазон скоростей обдува 2–

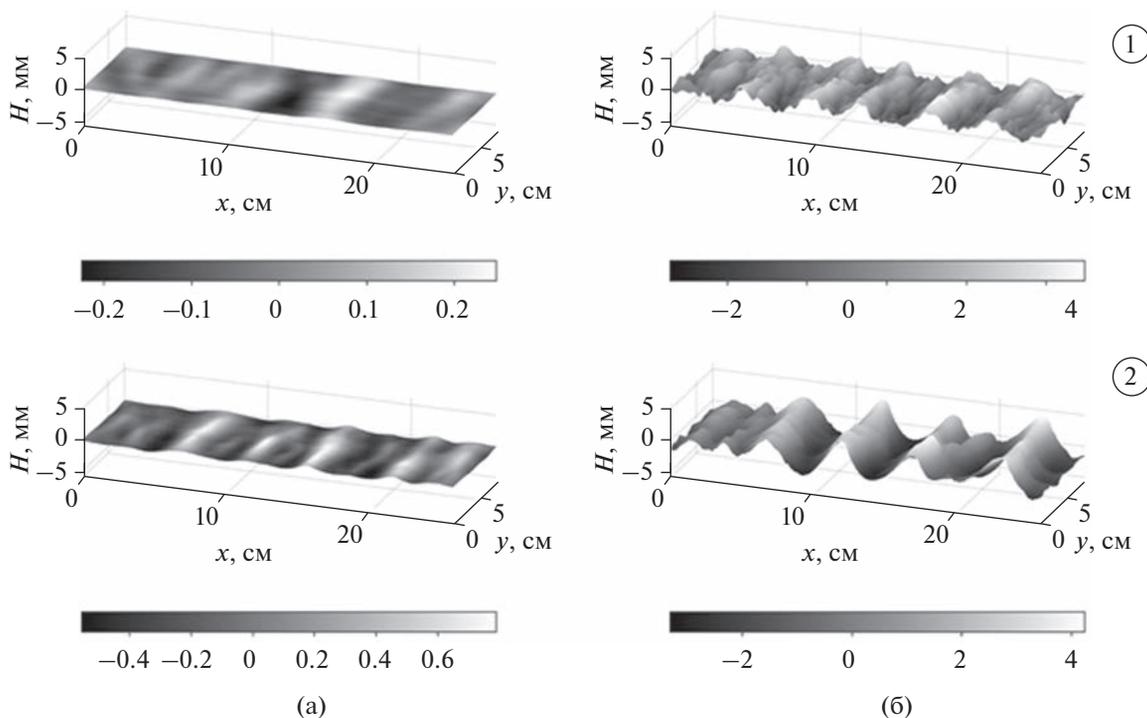


Рис. 4. Рельеф поверхности воды – 1 и этанола – 2 при скоростях обдува: а – 1.55 м/с и б – 3.88 м/с в канале 1.

2.5 м/с (на высоте 2.0 см) рассматривался как переходный с существенным усилением ветрового волнения, что соответствует нашим измерениям в воде. Если же теория не учитывает наличие поверхностной пленки — логичнее описывать возбуждение волнения в этаноле, а не в воде. Как видно, “критическая скорость” уменьшается в два раза, а “критическое напряжение” — существенно больше.

4. ВЛИЯНИЕ РАСТВОРИМЫХ ПРИМЕСЕЙ

Для исследования влияния растворимых примесей на формирование ветровых волн были проведены измерения в Т-образном ветровом канале (канал 2) шириной 20 см и полной длиной 133 см (с шириной 47 см и длиной 19 см широкой части канала). Т-образная форма канала использовалась для гашения обратных волн. Глубина составила 30 см. Длина канала близка к работам Longo (см, например, [Longo et al., 2012]), но там использовались очень малые глубины (105 мм) и очень большие скорости обдува (~11 м/с). Тем не менее, поскольку в [Longo et al., 2012] рассматривались профили скорости в воздухе и воде, сравнительный анализ представляет большой интерес.

В данной работе для канала 2 измерения проводились для чистой воды, а также с добавлением додецилсульфата натрия (SDS) с концентрациями 0.025 мМ (миллимоль на литр), 0.05 и 0.1 мМ, что составляет от 0.32 до 1.25% от критической концентрации мицеллообразования (ККМ, для SDS 8 мМ). Изменение коэффициента поверхностного натяжения для этих концентраций составляет не более нескольких процентов. В настоящее время такие изменения фиксируются при исследовании динамики воздушных пузырьков и капель в растворах, и точность таких измерений существенно выше классических методов при низких концентрациях ПАВ (см, например, [Izzet et al., 2020]). Рельеф поверхности измерялся для различных скоростей ветра в области от 23 до 58 см от начала канала с параллельным контролем этой области ИК-тепловизором на наличие или отсутствие пленки. На рис. 6 показаны примеры мгновенных карт рельефа поверхности для воды и трех концентраций SDS в воде и скоростях ветра 2.1 и 3.5 м/с во второй точке (40 см).

Из рис. 6 хорошо видно, что при одних и тех же скоростях обдува амплитуда волн тем меньше, чем больше концентрация SDS, и даже небольшая добавка растворимого поверхностно-активного вещества способна снизить амплитуду волн существенным образом. О том же самом нам говорит график зависимостей среднеквадратичного отклонения поверхности от скорости для воды с различной концентрацией SDS и для чистой воды (рис. 7).

Как и ранее, графики на рис. 7 получены путем усреднения по пространству и времени. Средние в разных сериях отличаются не более, чем на 0.06 мм.

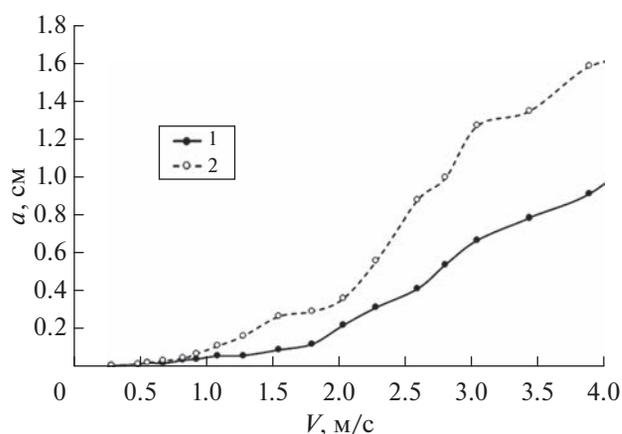


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичного отклонения поверхности a в канале 1 от скорости обдува V : 1 — в воде, 2 — в этаноле.

Как видно из рис. 7, область “2–2.5 м/с” [Федоров и др., 1988] с существенным изменением амплитуды волн сохраняется и для канала 2, но добавление растворимой примеси сдвигает эту область в сторону больших скоростей. Таким образом, вода оказывается в середине рассмотренной цепочки жидкостей с изменением степени влияния поверхностной пленки. Значения скорости обдува, для которых наблюдается резкий рост амплитуды волн, соответствуют скорости ветра на высоте 10 м порядка 6 м/с, что по порядку величины соответствует наблюдаемым скоростям разрыва пленки в природных условиях (до 10 м/с [Schlüssel et al, 1990; Федоров и др., 1988]).

5. БАЛАНС НАПРЯЖЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЕНКИ

Основная задача PIV в данной работе — демонстрация различия течения в объеме в зависимости от наличия или отсутствия поверхностной пленки. Но, конечно, данные PIV в воде могут использоваться и для многих других расчетов — для анализа распада волн (хорошо видно дробление вихрей под поверхностью), вычисления параметров логарифмического погранслоя в воде, анализа эволюции волн и др. [Banner et al., 1998; Siddiqui et al., 2007]. Вертикальные профили горизонтальной скорости в воде, получаемые с помощью метода PIV, позволяют оценить скорости трения в воде и критические напряжения, приводящие к разрыву пленки.

Если пренебречь эффектами, связанными с турбулизацией потока, то можно положить, что на границе

$$\tau_a = \tau_l, \quad (3)$$

где τ_a — касательное напряжение, создаваемое воздушным потоком, τ_l — напряжение на поверхности жидкости. Наличие пленки существенно

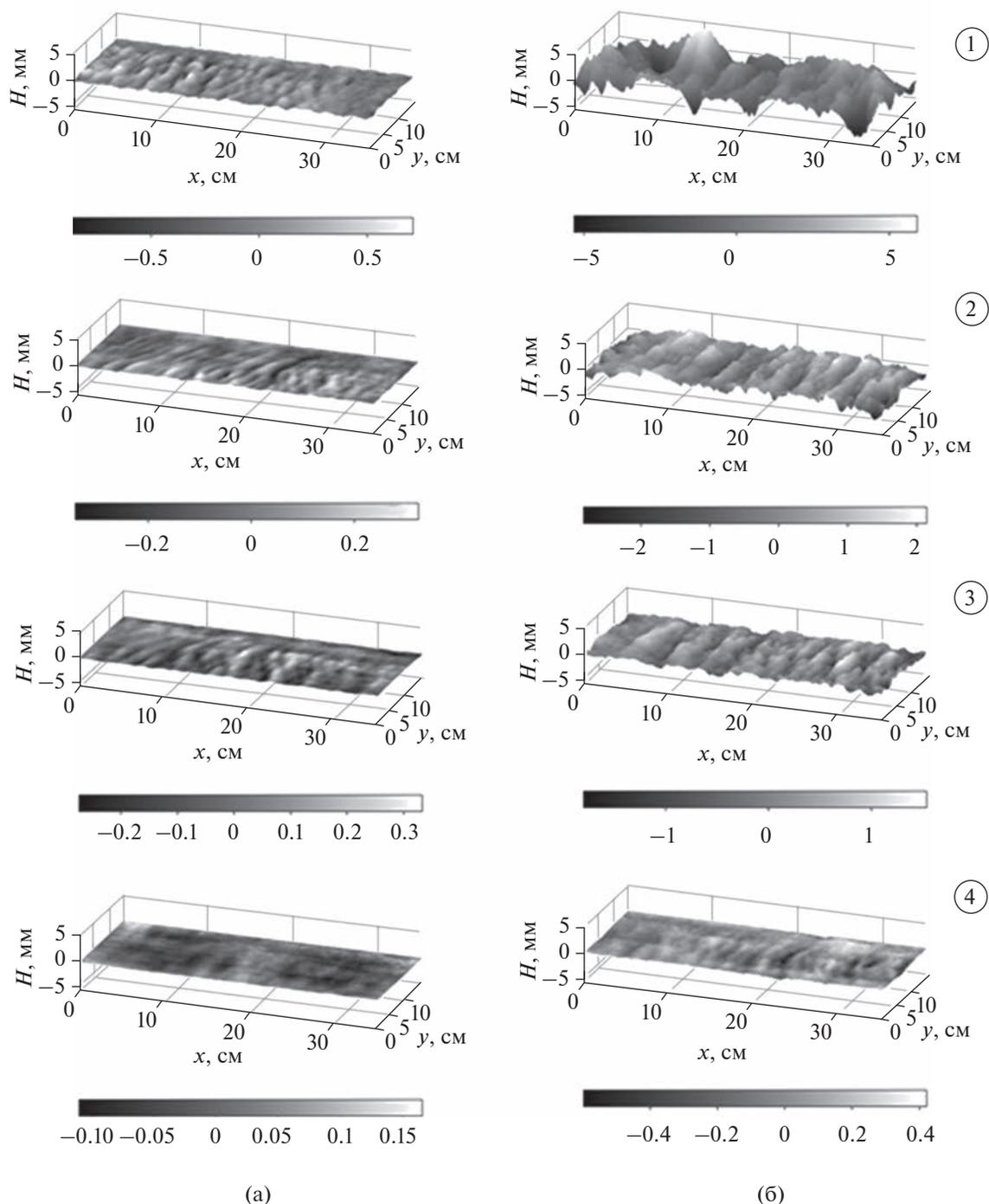


Рис. 6. Рельеф поверхности в воде в канале 2: 1 – без добавления SDS, 2 – 0.025 mM SDS, 3 – 0.05 mM SDS, 4 – 0.1 mM SDS, а – при скорости 2.1 м/с, б – 4 м/с.

перестраивает этот баланс. Теперь необходимо учитывать напряжения в пленке τ_f

$$\tau_a = \tau_l + \tau_f \quad (4)$$

и эти напряжения могут менять знак τ_l , что приводит к изменению знака вертикальной производной горизонтальной скорости в воде вблизи поверхности и даже к появлению участков по-

верхности, движущихся против ветра. В ряде случаев влияние пленки может быть не столь очевидно, если в зоне наблюдения скорость пленки направлена по ветру. В этом случае кажется, что поверхность свободно движется, но на самом деле движется пленка с напряжениями внутри. Напряжение τ_f при наличии пленки всегда присутствует и влияет на баланс касательных напряжений.

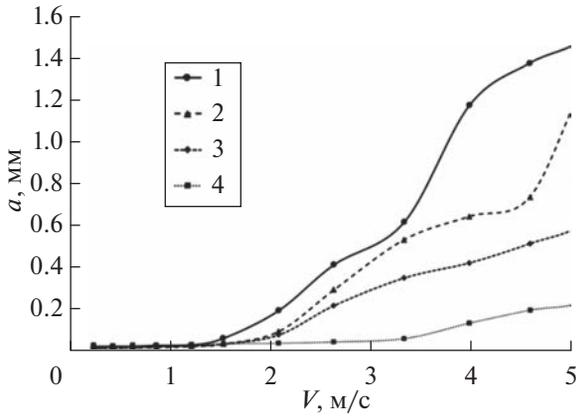


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичного отклонения поверхности a от скорости обдува V в чистой воде (1) и в воде с 0.025 mM SDS (2), 0.05 mM SDS (3), 0.1 mM SDS (4).

Логарифмический погранслои в воздухе и в воде определяется стандартным выражением [Монин и др., 1965; Голицын, 2013]

$$\frac{u}{u_{*a,w}} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (6)$$

где $u_{*a,w}$ — скорость трения в воде и воздухе, z_0 — высота шероховатости, κ — постоянная Кармана (0.41). Скорость u в воздухе — это горизонтальная скорость V на высоте z , а в воде — разность между скоростью дрейфа V_s на поверхности и скорости V_w на глубине z . Из формулы (6) следует, что про-

филь скорости зависит от шероховатости и может сильно меняться при изменении условий.

На рис. 8 представлен сравнительный анализ профилей усредненных по ширине (2 см) и времени (10 с) профилей горизонтальной скорости в вертикальной плоскости в середине канала, измеренных с помощью PIV в воде, на расстоянии 40 см от края канала при разных скоростях ветра. Профили 2 и 4 сходны по виду с профилями 3 и 5 и не приводятся на рис. 8а, чтобы не загромождать рисунок. Профиль 1 не логарифмический и на рис. 8б не приводится.

Как видно из рис. 8а, при низких скоростях ветра градиент скорости может быть направлен в противоположную сторону, а профиль искажается за счет напряжений в пленке и логарифмическим не является. Как уже отмечалось, скорость на поверхности может иметь и отрицательное значение, что коррелирует с ИК-изображениями с тепловизора. Скорость дрейфа может быть определена как из данных PIV путем достраивания линейного участка профиля скорости до поверхности, так и из результатов ИК-термографии посредством кросс-корреляционной обработки последовательных изображений, и эти данные хорошо согласуются между собой. Профили получены путем усреднения в сечении по центру канала и при наличии пленки являются локальными в том смысле, что в других сечениях они могут быть другими. Но логарифмический профиль под поверхностью выстраивается, хотя напряжения на поверхности определяются суммой сил (4). Из приведенных в логарифмическом масштабе про-

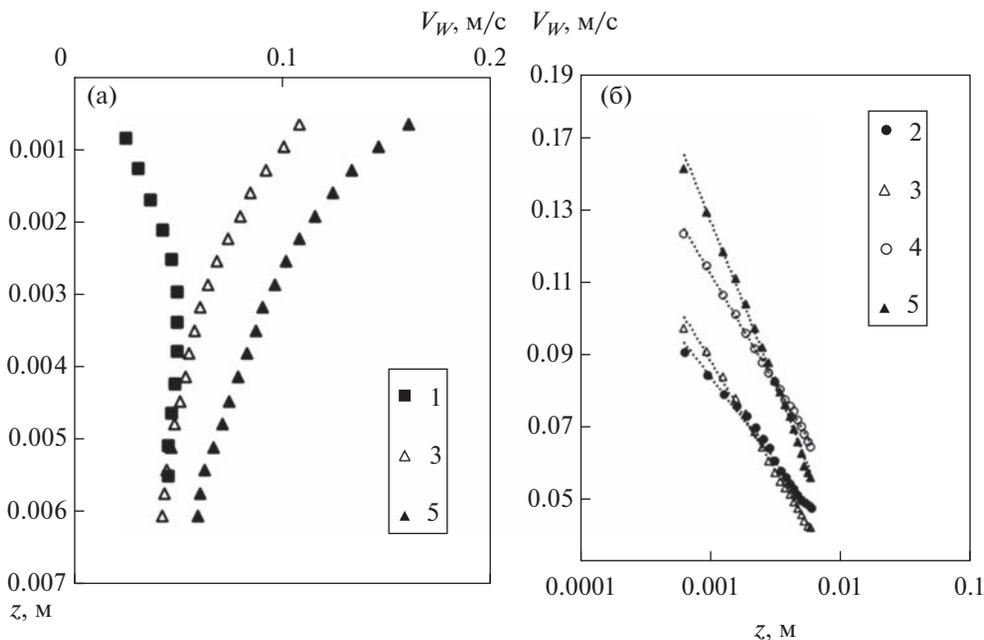


Рис. 8. Зависимость усредненного вертикального профиля скорости, полученного с помощью PIV в воде при разных скоростях ветра, а — в обычном, б — в логарифмическом масштабе. Скорость ветра на высоте 1.5 см над поверхностью воды: 1 — 0.65 м/с, 2 — 0.88 м/с, 3 — 1.23 м/с, 4 — 1.55 м/с, 5 — 2.1 м/с.

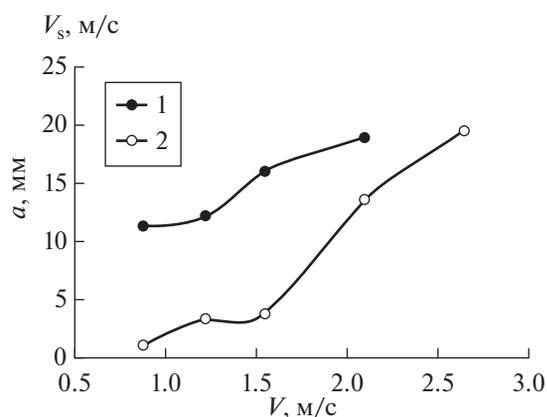


Рис. 9. Зависимость скорости движения поверхности по центру канала от скорости ветра 1 – в чистой воде, 2 – в воде с 0.1 mM SDS.

филей рис. 8б, с использованием формулы (6) можно найти скорости трения в воде. Для приведенных на графиках данных получены следующие значения u_{*w} : 2 – 0.98 см/с, 3 – 1.27 см/с, 4 – 1.27 см/с, 5 – 1.92 см/с. Разрыв пленки происходит через переходный этап, где часть пленки сохраняется на поверхности, а часть поверхности освобождается. Поэтому оценка “критических напряжений” носит приближенный характер. Расчет с использованием скоростей трения по стандартной формуле $\tau_{cr} = \rho_w u_{*w}^2$ (ρ_w – плотность воды) дает значения напряжений порядка десятых долей Па. Более точные данные по напряжениям в пленке могут быть найдены при сравнении результатов PIV в воде и воздухе при одновременном измерении на основе анализа баланса сил.

Сравнение профилей скорости в воде в работах [Siddiqui et al., 2007; Longo et al., 2012] демонстрирует существенную разницу в дрейфовых скоростях при одинаковой скорости ветра, что связано, по-видимому, с разницей в геометрических размерах каналов. Проведенные нами измерения не противоречат полученным в этих работах данным и больше соответствуют [Longo et al., 2012], где длина канала составляла 97 см.

Как уже отмечалось, дрейфовые скорости получались двумя способами и на рис. 9 представлены результаты для чистой воды и воды с SDS (0.1 mM) в диапазоне скоростей, где ветровое волнение существенно влияло на дрейфовый поток (для SDS эта область больше). Эти данные, как и предыдущие результаты, получены при усреднении профилей в сечении по центру канала.

Как видно из графиков на рис. 9, наличие SDS на поверхности приводит к уменьшению скорости движения поверхности, но с увеличением скорости ветра разность в скоростях движения поверхности воды и воды с добавлением SDS уменьшается, хотя амплитуда волн отличается

достаточно сильно. Эти результаты указывают на сложный характер взаимодействия на границе раздела сред и необходимость сравнительного анализа для воды и растворов с целью определения основных факторов, влияющих на амплитуду волн, скорость дрейфа и скорости трения при сходных условиях обдува.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основное внимание в работе уделяется влиянию холодной пленки на взаимодействие ветра с поверхностью жидкости. ИК-термография с методом PIV позволяет проанализировать течение при наличии пленки и сделать вывод о том, что даже знак скорости течения вблизи поверхности может меняться на противоположный. Холодная пленка представляет собой интересное образование, которое легко разрушается (но очень быстро восстанавливается), не препятствует испарению и вихревым движениям. Как видно из приведенных результатов, ветровое воздействие на воду с холодной пленкой трудно описывать существующими теориями и построение строгой сопряженной теории зарождения ветровых волн потребует решения задачи гидродинамики поверхности с учетом адсорбции-десорбции примесей и отдельного анализа сложного граничного условия. Анализ рельефа поверхности при разных скоростях ветра в этаноле, чистой воде и воде с примесью ПАВ позволяет сделать вывод о существенном влиянии холодной пленки на амплитуду волн. Сравнение с этанолом неоднократно использовалось при анализе взаимодействия на границе раздела сред. Моделирование образования ветровых волн в этаноле – намного более простая задача, чем в воде, потому что для этанола можно отбросить фактор пленки. Влияние пленки очень существенно – резкое увеличение волнения в этаноле начинается гораздо раньше, чем в воде. Еще одно свойство холодной пленки состоит в том, что, если проводить измерения в зоне, где пленка движется в одном направлении, то трудно понять, что она тоже может вносить вклад в баланс напряжений. Однако сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими представлениями ясно демонстрирует этот факт. Добавление растворимых примесей даже в очень малых концентрациях существенно усиливает пленку. Цепочка “этанол–вода–вода с SDS” демонстрирует постепенное усиление “фактора пленки”. Еще один неприятный с точки зрения построения строгой теории момент состоит в том, что скорость адсорбции из объема на поверхность очень велика, и даже при сильном ветре и большой амплитуде волн возможны эффекты, связанные с восстановлением пленки на некоторых участках поверхности. Разброс любых экспериментальных данных по разрыву пленки легко объясняется различием ее реологических свойств

в разных условиях. Концентрация примеси зависит даже от предыстории ветрового воздействия на данную водную поверхность, так как с течением времени при действии ветра слой вблизи поверхности очищается от примесей.

7. ВЫВОДЫ

Проведен анализ влияния холодной пленки на образование ветровых волн. Холодная пленка возникает в любой воде (кроме деионизированной) из-за небольшого количества примесей, которых оказывается достаточно, чтобы блокировать конвекцию Марангони и массообмен с поверхностью. Эта пленка по своим свойствам сильно отличается от обычно рассматриваемых конденсированных пленок в силу того, что не препятствует движению на поверхности, но ее прочность оказывается достаточной, чтобы до критических скоростей ветра пленка сохранялась и могла менять направление горизонтальной скорости на поверхности воды на противоположное направлению ветра.

Малые скорости ветра и слабое волнение потребовали одновременного использования трех современных методов регистрации — цветного шпирен-метода для фиксации рельефа поверхности, PIV для определения поля скорости в воде и ИК-термографии для определения наличия пленки и измерения поля скорости на поверхности. Сочетание методов позволяет получить однозначную картину течения. Основное свойство холодной пленки — это быстрое восстановление после разрыва и здесь важную роль играют растворимые примеси и процессы адсорбции. Добавление малых концентраций SDS позволяет усилить эффект, который уже есть в обычной воде, что существенно отличает наше исследование от стандартного изучения влияния больших концентраций ПАВ на гашение волн. Полученные критические значения скорости ветра, приводящие к разрыву пленки, соответствуют известным по наблюдениям в натуральных и лабораторных условиях. В работе круг рассматриваемых вопросов специально ограничивается влиянием холодной пленки с точки зрения ее силового воздействия и изменения баланса напряжений на границе раздела сред. Очевидно, что наличие холодной пленки сильно усложняет решение сопряженных задач на границе раздела сред, но без ее учета точный анализ невозможен.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00135). Было использовано оборудование, приобретенное за счет средств Программы развития Московского университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голицын Г.С. Статистика и динамика природных процессов и явлений. Методы, инструментарий, результаты. М.: Красанд, 2013. 400 с.
- Дружинин О.А. О динамике дрейфового течения при слабом ветре // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 743–752.
- Кандауров А.А., Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Вдовин М.И., Байдаков Г.А. Среднее поле скорости воздушного потока над поверхностью воды при лабораторном моделировании штормовых и ураганских условий в океане // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 4. С. 455–467.
- Ламб Г. Гидродинамика. М.: ОГИЗ, 1947. 929 с.
- Монин А.С., Яглом А.Я. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 640 с.
- Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. М.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
- Плаксина Ю.Ю., Пуштаев А.В., Винниченко Н.А., Уваров А.В. Влияние малых примесей на формирование структур при конвекции Рэлея-Бенара-Марангони в плоском слое жидкости. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2018. Т. 5. С. 56–62.
- Реутов В.П., Езерский А.Б., Рыбушкина Г.В., Чернов В.В. Конвективные структуры в тонком слое испаряющейся жидкости, обдуваемой воздушным потоком // ПМТФ. 2007. Т. 48. № 4. С. 3–14.
- Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
- Черноусько Ю.Л., Шумилов А.В. Испарение и микроконвекция в тонком поверхностном слое // Океанология. 1971. Т. 11. № 6. С. 982–986.
- Banner M.L., Peirson W.L. Tangential stress beneath wind-driven air-water interfaces // J. Fluid Mech. 1998. V. 364. P. 115–145.
- Benetazzo A., Fedele F., Gallego G., Shih P.-C., Yezzi A. Off-shore stereo measurements of gravity waves // Coast. Eng. 2012. V. 64. P. 127–138.
- Deskos G., Lee J.C.Y., Draxl C.A., Sprague M.A. Review of wind-wave coupling models for large-eddy simulation of marine atmospheric boundary layer // J. Atmos. Sci. 2021. V. 78. № 10. P. 3025–3045.
- Izzet A., Moerman P.G., Gross P., Groenewold J., Hollingsworth A.D., Bibette J., Izzet J.B. Tunable persistent random walk in swimming droplets // Phys. Rev X. 2020. V. 10. P. 021035.
- Jähne B., Klinke J., Waas S. Imaging of short ocean wind waves: a critical theoretical review // JOSA A. 1994. V. 11. № 8. P. 2197–2209.
- Katsaros K.B., Liu W.T., Businger J.A., Tilman J.A. Heat transport and thermal structure in the interfacial boundary layer measured in an open tank of water in turbulent free convection // J. Fluid Mech. 1977. V. 82. № 2. P. 311–335.
- Keane R.D., Adrian R.J. (1992) Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Appl. Sci. Res. 1992. V. 49. P. 191–215.
- Kosnik M.V., Dulov V.A. Extraction of short wind wave spectra from stereo images of the sea surface // Meas. Sci. Technol. 2011. V. 22. № 1. P. 015504.
- Kou J., Judd K.P., Saylor J.R. The temperature statistics of a surfactant-covered air/water interface during mixed

- convection heat transfer and evaporation // *Int. J. Heat Mass Transfer* 2011. V. 54. P. 3394–3405.
- Kudryavtsev V., Shrira V., Dulov V., Malinovsky V.* On the Vertical Structure of Wind-Driven Sea Currents // *J. Phys. Oceanogr.* 2008. V. 38. P. 2121–2144.
- Li T., Shen L.* The principal stage in wind-wave generation // *J. Fluid Mech.* 2022. V. 934. P. A41.
- Longo S., Chiapponi L., Clavero M., Mäkelä T., Liang D.* Study of the turbulence in the air-side and water-side boundary layers // *Coast. Eng.* 2012. V. 69. P. 67–81.
- Miles J.W.* On the generation of surface waves by shear flows // *J. Fluid Mech.* 1957. V. 3. № 2. P. 185–204.
- Moisy F., Rabaud M., Salsac K.* A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface // *Exp. Fluids.* 2009. V. 46. P. 1021–1036.
- Pawliszak P., Ulaganathan V., Bradshaw-Hajek B.H., Manica R., Beattie D.A., Krasowska M.* Mobile or immobile? Rise velocity of air bubbles in high-purity water // *J. Phys. Chem. C* 2019. V. 123. P. 15131–15138.
- Phillips O.M.* On the generation of waves by turbulent wind // *J. Fluid Mech.* 1957. V. 2. № 5. P. 417–444.
- Raffel M., Willert C.E., Scarano F., Kähler C.J., Wereley S.T., Kompenhans J.* (2007) Particle image velocimetry: a practical guide. Third edition. Springer: Berlin, 2018. 669 p.
- Rudenko Y.K., Vinnichenko N.A., Plaksina Y.Y., Pushtaev A.V., Uvarov A.V.* Horizontal convective flow from a line heat source located at the liquid–gas interface in presence of surface film. // *J. Fluid Mech.* 2022. V. 944. P. A35.
- Schlüssel R., Emery W.J., Grassel H., Mammen N.* On the bulk skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 13341–13356.
- Siddiqui K., Loewen M.R.* Characteristics of the wind drift layer and microscale breaking waves // *J. Fluid Mech.* 2007. V. 573. P. 417–456
- Veron F., Melville W.K.* Experiments on the stability and transition of wind-driven water surfaces // *J. Fluid Mech.* 2001. V. 446. P. 25–65.
- Veron F., Melville W.K., Lenail L.* The effects of small-scale turbulence on air–sea heat flux // *J. Phys. Oceanogr.* 2011. V. 41. № 1. P. 205–220.
- Vinnichenko N.A., Plaksina Yu.Yu., Baranova K.M., Push-taev A.V., Uvarov A.V.* Mobility of free surface in different liquids and its influence on water striders locomotion // *Environ. Fluid Mech.* 2018. V. 18. P. 1045–1056.
- Vinnichenko N.A., Pushtaev A.V., Plaksina Y.Y., Uvarov A.V.* Measurements of liquid surface relief with moon-glade background oriented schlieren technique // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2020. V. 114. P. 110051.
- Yousefi K, Veron F., Buckley M.P.* Turbulent and wave kinetic energy budgets in the air flow over wind-generated surface waves // *J. Fluid Mech.* 2021. V. 920. A33.
- Zavadsky A., Shemer L.* Water waves excited by near-impulsive wind forcing // *J. Fluid Mech.* 2017. V. 828. P. 459–495.
- Zavadsky A., Benetazzo A., Shemer L.* On the two-dimensional structure of short gravity waves in a wind wave tank // *Phys. Fluids.* 2017. V. 29. 016601.
- Zhang X., Cox C.* Measuring the two-dimensional structure of wavy water surface optically: A surface gradient detector // *Exp. Fluids* 1994. V. 7. P. 225–237.
- Zhang X., Dabiri D., Gharib M.* Optical mapping of fluid density interfaces: Concepts and implementations // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. V. 67. № 5. P. 1858–1868.

Influence of the Weak Surface Film on Formation and Propagation of Wind Waves in a Channel

Yu. Yu. Plaksina¹*, A. V. Pushtaev¹, N. A. Vinnichenko¹, and A. V. Uvarov¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskiye Gory, 1/2, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: yu-plaksina@mail.ru

Processes of the wind waves formation remain poorly understood, despite the numerous studies. One of the main reasons, in our opinion, is that simplified theoretical analysis does not take into account the weak film of natural contaminants. In the present work waves generation in two channels is experimentally studied and compared for ethanol, water and water with addition of soluble surfactant SDS (sodium dodecyl sulphate) in various concentrations. The employed concentrations hardly affect the surface tension coefficient, but lead to significant modification of the subsurface flow structure. In ethanol the surface film is not formed, so it can be considered as reference case. In water and water with added surfactant the film gets broken and the surface becomes clean at certain critical wind speed, which grows for increasing surfactant concentration. For the surface to remain clean, the contaminant adsorption to the surface must be compensated by its removal by the tangential stress. Three experimental techniques are used to study the influence of cool skin on formation of the wind waves. The surface relief is measured with modified color schlieren technique and the liquid velocity fields are determined with Particle Image Velocimetry (PIV). The surface temperature fields, which allow identification of the regions of the cool skin rupture, are obtained with IR thermography. IR thermography is also used to study the surface velocity field (IR PIV). The film is shown to have significant influence on both the waves amplitude and the structure of subsurface flow.

Keywords: surface film, wind waves, PIV, IR thermography, color schlieren method