

Скорость испарения при обдуве водной поверхности замедляющимся воздушным потоком

И. Н. Иванова [✉], О. Н. Мельникова

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[✉] ivair@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.09.2025; одобрена после рецензирования 28.10.2025;
принята к публикации 16.03.2026.

Аннотация

Цель. Исследовать влияние продольного профиля скорости воздушного потока на процесс испарения, рассмотреть ускоряющийся, равномерный и замедляющийся потоки воздуха – цель настоящей работы.

Методы и результаты. В лабораторном эксперименте изучался процесс испарения с поверхности воды, обдуваемой ветром, скорость которого заключалась в диапазоне 0,68–7 м/с. Эксперименты проводились в прямом ветро-волновом канале при различной конфигурации поля ветра, обусловленной выбором параметров установки. Был использован открытый канал и канал, частично накрытый съемной крышей. Наклонная крыша и заданная скорость воздушного потока позволяли получить ускоряющийся, равномерный и замедляющийся потоки воздуха. Определялся объем испарившейся жидкости при фиксированных значениях скорости воздушного потока, температуры воды и воздуха, температуры поверхности воды, относительной влажности воздуха. Скорость испарения определялась с плоской поверхности воды и при наличии ветровых волн, крутизна которых менялась в диапазоне $0,1 < ak < 0,31$.

Выводы. Обнаружено, что скорость испарения с плоской поверхности существенно выше в замедляющемся потоке воздуха по сравнению с равномерным и ускоряющимся. При наличии ветровых волн в замедляющемся потоке воздуха скорость испарения растет при увеличении крутизны волны. Дополнительное увеличение испарения возникает при наличии капиллярных волн на переднем склоне нелинейных ветровых волн.

Ключевые слова: испарение, скорость испарения, давление насыщенных паров, естественная конвекция, пограничный слой, вихри в пограничном слое, тормозящиеся потоки жидкости, ветровые волны


Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Для цитирования: Иванова И. Н., Мельникова О. Н. Скорость испарения при обдуве водной поверхности замедляющимся воздушным потоком // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 3. С. 436–446. EDN KBBFUV.

Rate of Evaporation when Water Surface is Blown by a Decelerating Air Flow

I. N. Ivanova , O. N. Melnikova

¹ M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

 ivair@yandex.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to investigate the impact of the longitudinal profile of air flow velocity on the evaporation process, and to consider the accelerating, uniform and decelerating air flows.

Methods and Results. The process of evaporation from the water surface blown by wind, the speed of which varied within the range 0.68–7 m/s was studied in the laboratory experiments. The latter were conducted in a direct wind-wave channel at different wind field configurations conditioned by the choice of installation parameters. An open channel and a channel partially covered with a removable roof were used. The sloping roof and the preset air flow speed made it possible to obtain the accelerating, uniform and decelerating air flows. The volume of evaporated liquid was determined at the fixed values of air flow speed, water and air temperatures, water surface temperature, and relative air humidity. The evaporation rate was defined from a flat water surface and in the presence of wind waves, the steepness of which varied within the range $0,1 < ak < 0,31$.

Conclusions. It has been established that the rate of evaporation from a flat surface at a decelerating air flow significantly exceeds those recorded at the uniform and accelerating ones. When wind waves are in a decelerating air flow, the evaporation rate increases with the growing wave steepness. The evaporation is additionally enhanced in case the capillary waves are present on the front slope of nonlinear wind waves.

Keywords: evaporation, evaporation rate, saturated vapor pressure, natural convection, boundary layer, vortices in a boundary layer, decelerating liquid flows, wind waves

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment of M. V. Lomonosov Moscow State University.

For citation: Ivanova, I.N. and Melnikova, O.N., 2026. Rate of Evaporation when Water Surface is Blown by a Decelerating Air Flow. *Physical Oceanography*, 33(3), pp. 471-481.

Введение

Испарение с поверхности океана имеет определяющее значение для влагооборота и переноса тепла системы океан – атмосфера. На испарение тратится, а при конденсации выделяется, более 1/3 всего тепла, поступающего на Землю. Процесс испарения обеспечивает поступление водяного пара в атмосферу. Интенсивность испарения определяется рядом факторов, одним из которых является наличие ветровых волн. Большое количество исследований посвящено этому вопросу. Результаты анализа натуральных данных показали, что существенную роль для интенсивности испарения играет высота и крутизна поверхностных волн [1]. Максимальная интенсивность испарения достигается на мелководьях в шторм [2]. В работе [3] приведена оценка увеличения испарения при наличии волн и усилении штормов для мелководного Северного Каспия. В работах [4–6] показано, что температура и влажность зависят от скорости ветра и наличия ветровых волн на поверхности воды. В [3, 7] оценена

сезонность такого влияния, обусловленная глубиной водоема и параметрами ветровых волн. При достижении критического значения крутизны волны происходит обрушение гребней, формирующих «ныряющие» и «скользящие буруны» [8]. Этот процесс приводит к увеличению интенсивности испарения (напр., на 15 % при ветре 10 м/с в северной части Каспийского моря) [3]. В работе [9] экспериментально исследовалось влияние скорости ветра на скорость испарения морской воды в слое с плоской поверхностью.

Другим важным фактором взаимодействия волн и воздушного потока является генерация капиллярных волн на склонах энергонесущих волн. Предложено несколько механизмов генерации таких волн. В работе [10] увеличение испарения связывается с ростом крутизны энергонесущих волн в процессе усиления ветра. Предполагается, что при достижении критического значения крутизны основной волны на ее гребне поверхностное натяжение должно иметь локальный максимум, порождающий шлейф капиллярных волн на переднем склоне основной гравитационной волны. Наблюдения подтверждают появление капиллярных волн на переднем склоне основной волны и их отсутствие на заднем склоне.

Иной механизм предложен в работе [11], где априори предполагается, что капиллярные волны, называемые автором «паразитной» рябью, существуют на всей поверхности основных волн, переносящих энергию. Отмечается, что эти волны не позволяют экспериментально получить детальную картину течения в вязком слое. В качестве альтернативы используется прямое численное моделирование (*DNS*) течения над взволнованной поверхностью в присутствии синусоидальной капиллярной «ряби», которая задается искусственно. Было обнаружено появление вихревых структур типа «лямбда вихрей» в пограничном слое ветрового потока, когда вихри отрываются от водной поверхности и улетают в толщу воздушного потока.

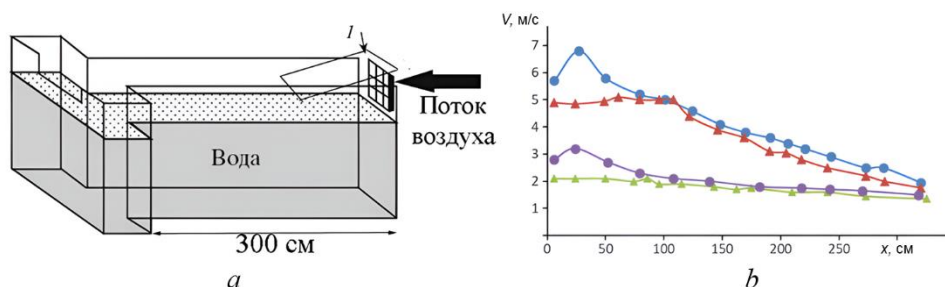
Начиная с Кельвина, Джеффриса, Шулейкина, генерацию капиллярных волн связывают с образованием вихрей на переднем склоне основной волны, на котором скорость ветра убывает вдоль разгона за счет расширения воздушного потока. В работе [12] экспериментально показано, что в замедляющемся потоке жидкости у плоской границы раздела происходит периодическая остановка вязкого слоя за счет силы трения на нижней границе слоя и обратного градиента давления на верхней границе. Внутри пограничного слоя возникает потеря устойчивости ламинарного течения и формируются цепочки вихрей, диаметр которых имеет порядок толщины вязкого слоя [13]. В работе [14] показано, что вихри в воздушном потоке, расположенные у поверхности воды, деформируют поверхность за счет уменьшения давления под вихрем, что приводит к генерации капиллярных волн. Эти вихри играют важную роль в интенсификации испарения, так как они формируются у поверхности воды в зоне максимальной влажности и под действием силы Жуковского поднимаются в толщу потока.

Скорость испарения важна для процесса опреснения морской воды, которая является потенциальным источником чистой воды. Цель данной работы – исследовать влияние продольного профиля скорости воздушного потока на процесс испарения, экспериментально определить скорость испарения с плоской поверхности воды и с взволнованной поверхности в замедляющемся

в направлении движения воздушном потоке и в потоке с однородным продольным профилем скорости для тех же значений термогидродинамических параметров.

Аппаратура и методика эксперимента

Эксперименты проводились в лабораторном ветро-волновом канале кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Схема установки показана на рис. 1, *a*.



Р и с. 1. Схема установки (*l* – наклонная съемная крыша на участке $x < 1$ м) – *a*; продольные профили скорости ветра при его разных значениях: линии с синими и фиолетовыми кружочками – канал без крыши, линии с красными и зелеными треугольниками – канал частично накрыт крышей – *b*

F i g. 1. Installation scheme (*l* – inclined removable roof on section $x < 1$ m) – *a*; longitudinal profiles of wind speed at its different values: lines with blue and purple circles denote the channel without roof, lines with red and green triangles – the channel partially covered with roof – *b*

Длина прямого канала постоянного поперечного сечения составляет 3 м, ширина этой части канала 0,15 м. На выходе ширина канала увеличивается до 0,45 м (длина участка 0,5 м), что обеспечивает уменьшение амплитуды волн и скорости ветра на выходе канала. Стоячие волны при изучаемых скоростях ветра в наших экспериментах не наблюдались. Ветрогенератор подавал в канал воздух через решетку параллельных прямоугольных ячеек, обеспечивая его плоскопараллельный поток.

Для исследования ветровых волн часто применяются похожие экспериментальные установки, но бóльших размеров. В [15] описаны ветро-волновые каналы размерами $15 \times 0,8 \times 1,6$ м (Институт Киото), $15 \times 0,4 \times 0,4$ м (ИПФ РАН), $6,5 \times 0,3 \times 0,8$ м (Университет Киндай), слой воды в них во время экспериментов составлял 0,8, 1,5 и 0,5 м; скорость ветра в диапазонах 4,7–43 и 8,5–21 м/с измерялась с помощью лазерных анемометров; колебания уровня воды оценивались с помощью струнных волнографов и трубки Пито; использовался замкнутый контур подачи воздуха, что ограничивает изучение процесса испарения областью больших значений относительной влажности.

Для определения усредненного в поперечном сечении поля скорости воздушного потока в нашем эксперименте использовался анемометр *RGK AM 30*, который размещался над поверхностью воды на оси канала в области, где средняя скорость воздуха не менялась по вертикали. Координата определялась по автомобильным профилям [16]. Для достижения максимальной скорости ветра

7 м/с однородный участок вертикального профиля располагался выше вертикальной координаты 5 см над невозмущенным уровнем поверхности воды, что соответствует экспериментальным результатам других авторов [17, 18]. Погрешность измерений скорости воздушного потока составляла $\pm(0,5 + 0,05 \cdot u)$, где u (м/с) – значение измеряемой скорости воздушного потока.

С помощью метеостанции *NGY 301A* с выносным датчиком в лаборатории проводились измерения усредненных по времени значений температуры воды, воздуха и его относительной влажности. Погрешность измерений температуры составляла 0,1 °С, влажности $\pm 5\%$ от показаний, но не менее 1%. Эксперименты проводились в течение 4–5 часов в дневное время, без искусственного освещения. Средняя температура воздуха в лаборатории составляла 21–24 °С, влажность 18–19%. Для определения скорости испарения измерялось смещение уровня воды во времени, которое фиксировалось один раз в час в течение эксперимента. Положение уровня определялось с помощью мерной иглы шпигенмасштаба по шкале с ценой деления 10^{-4} м. Для определения параметров ветровых волн выполнялась видеозапись смещения поверхности воды. За время проведения эксперимента скопления пыли на поверхности воды не наблюдалось.

Методика определения скорости испарения

Для определения скорости испарения с поверхности воды в работе использован ряд эмпирических формул. В соответствии с эмпирическим законом Дальтона (1803 г.) скорость испарения E можно описать выражением

$$E = cp(1 - q), \quad (1)$$

где p – давление насыщенного пара при температуре водной поверхности; q – относительная влажность воздуха в лаборатории в долях единицы (произведение qp – парциальное давление воздушной смеси при температуре и относительной влажности в помещении); эмпирический коэффициент c учитывает влияние скорости обдува на скорость испарения.

Обзор и анализ существующих эмпирических формул для скорости испарения при обдуве поверхности воды воздухом приведен в работах [19, 20]. Пример предложенных зависимостей для расчета скорости испарения и эмпирического коэффициента c при обдуве плоской поверхности воды и значениях скорости воздуха $u < 3$ м/с можно найти в работе [21]:

$$c = a + bu, \quad a = 0,000116, \quad b = 0,000126. \quad (2)$$

Здесь u – усредненное по поперечному сечению значение скорости обдува, коэффициенты a и b даны для расчетов в системе СИ. В работе [22] показано, что в том же диапазоне значений скорости ветра ветровые волны на поверхности воды не образуются, это согласуется с условием применения формулы (2) только для плоской поверхности воды.

В настоящей работе экспериментальное исследование влияния капиллярно-гравитационных ветровых волн в зоне генерации на испарение с водной поверхности проведено при условии $p(1 - q) > 0$. По определению, скорость

испарения жидкости равна объему или массе жидкости, испарившейся с единичной площадки поверхности воды в единицу времени:

$$E = \frac{m}{ST} = \rho \frac{V}{ST} = \rho \frac{h}{T}, \quad (3)$$

где m – масса испарившейся жидкости плотности ρ с площади S за время T . Если температура воды слабо меняется в течение эксперимента, а площадь поверхности воды в канале постоянна, то скорость испарения будет определяться толщиной слоя воды h , испарившегося за время T .

Так как изменение уровня поверхности воды фиксировалось один раз в час, такое изменение уровня определяло толщину слоя воды, испарившейся с единичной поверхности за это время. Порядок величины h за час составлял десятые доли миллиметра. В эксперименте определялась скорость испарения для заданной скорости воздушного потока. С учетом формул (1) – (3) параметр c определялся как отношение скорости испарения к перепаду парциального давления в пограничном слое воздушного потока:

$$c = \frac{E}{p(1-q)} = \frac{\rho h}{Tp(1-q)}. \quad (4)$$

То есть скорость испарения является линейной функцией разности давления насыщенных паров у поверхности воды и парциального давления воздушной смеси при температуре и относительной влажности в лаборатории [23]. В приведенных в работах [19, 20] формулах расчета скорости испарения учитываются такие основные параметры, как конвекция и обдув поверхности воды воздушным потоком, но не всегда принимается во внимание влияние деформации водной поверхности, поверхностных пленок различной природы на процесс испарения. Предложенная методика расчета скорости испарения позволяет экспериментально исследовать это влияние.

Обсуждение результатов экспериментов

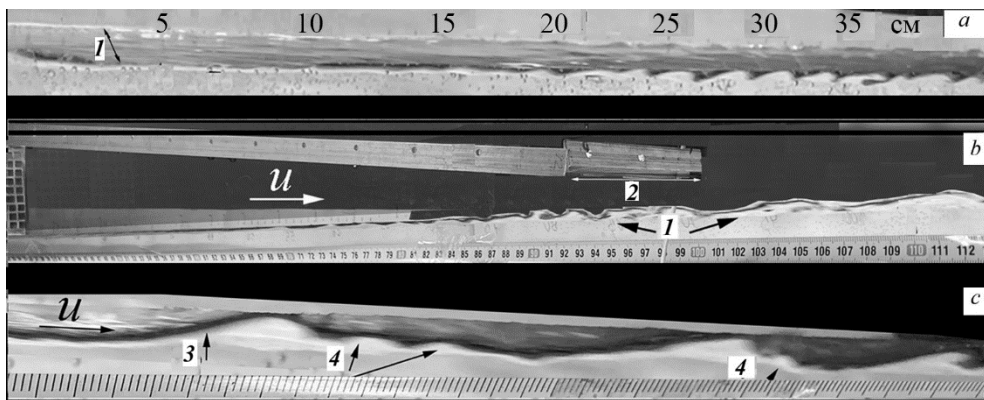
В проведенных экспериментах определялась скорость испарения с поверхности воды в открытом канале и в канале с наклонной крышей при скорости ветра 0,68–7 м/с. Съемная крыша устанавливалась под углом к горизонту, что позволило получить нужный профиль скорости воздуха вдоль горизонтальной оси. В сужающемся канале формировался ускоряющийся поток воздуха, а в расширяющемся канале поток воздуха замедлялся. Для создания равномерного потока воздуха крыша устанавливалась под малым углом к горизонту, образуя сужающийся канал. Равномерный поток формировался в том случае, когда увеличение скорости воздуха вдоль канала полностью компенсировалось потерями на трение. При горизонтальной установке крыши (так же как и в открытом канале) скорость потока воздуха убывала вдоль продольной оси за счет трения на границах.

В первой серии экспериментов средняя скорость воздушного потока в однородной части вертикального профиля (5 см над поверхностью воды) не превышала 3 м/с. В этой серии ветровые волны на плоской поверхности воды не возникали, что соответствует результатам экспериментальной работы [22]. Во второй серии скорость ветра задавалась в диапазоне 3–7 м/с на входе в канал.

В каждом эксперименте определялся продольный профиль скорости ветра в открытом канале и в канале под крышей (рис. 1, *b*).

Согласно указанному рисунку, скорость под наклонной крышей (линии с красными и зелеными треугольниками) на участке $x < 1$ м не меняется вдоль x , что достигается подбором угла наклона крыши. Скорость ветра в открытом канале убывает на всем его протяжении, начиная с координаты $x = 0,15$ м. Скорость ветра под крышей ниже скорости в открытом канале для того же значения горизонтальной координаты. За границей крыши на участке $x > 1$ м скорость ветра убывает вдоль x . В зоне торможения воздушного потока в канале с крышей и в открытом канале формируются устойчивые ветровые волны, если скорость ветра превышает 3 м/с [24].

На рис. 2 показана поверхность воды на входе в открытый канал, у торца крыши и в зоне усиления волн при скорости потока воздуха на входе 7 м/с. На участке $0 < x < 15$ см устойчивых ветровых волн нет (рис. 2, *a*). Согласно данным, приведенным на рис. 1, на этом участке скорость воздушного потока растет вдоль горизонтальной координаты. В соответствии с работой [22], в ускоряющемся потоке жидкости волны не образуются, так как не формируются цепочки вихрей вблизи вязкого слоя воздушного потока. В зоне торможения потока воздуха ($x > 15$ см) на поверхности воды в открытом канале видны регулярные короткие волны длиной 2 см (рис. 2, *a*), что соответствует результатам указанной работы.



Р и с. 2. Фотография водной поверхности в ходе эксперимента: зона генерации ветровых волн в начале открытого канала ($x > 0,15$ м) – *a*; канал под крышей – *b*; нелинейные ветровые волны – *c*; 1 – поверхность воды; 2 – торец крыши; 3 – задний склон нелинейной волны; 4 – капиллярные волны на переднем склоне основной волны

F i g. 2. Photograph of water surface during the experiment: zone of wind wave generation at the beginning of the open channel ($x > 0.15$ m) – *a*; channel under the roof – *b*; nonlinear wind waves – *c*; 1 – water surface; 2 – roof end; 3 – back slope of nonlinear wave; 4 – capillary waves on the front slope of main wave

На рис. 2, *b* показан участок канала рядом с торцом наклонной крыши, под крышей ветровых волн на поверхности воды нет. На этом участке скорость потока не меняется вдоль оси x (рис. 1). Согласно работе [22], в равномерном потоке не образуются цепочки вихрей в пограничном слое у поверхности воды, порождающие ее деформацию в виде регулярных волн; на координатах

$x > 1$ м видны ветровые волны длиной 5 см в зоне, где скорость потока убывает вдоль оси x . На рис. 2, c показаны нелинейные ветровые волны с пологим задним склоном. На переднем склоне видны капиллярные волны длиной 1 см. Эти волны возникают в зоне расширения ветрового потока, если скорость ветра выше фазовой скорости волны (молодые волны) [22, 24]. Согласно результатам указанных работ, причиной генерации волн является воздействие цепочки цилиндрических вихрей, возникающих в вязком слое тормозящегося воздушного потока, где влажность воздуха максимальна. Перемещаясь в толщу воздушного потока под действием обобщенной силы Жуковского, вихри доставляют влажный воздух, интенсифицируя процесс испарения. В работе [25] показано, что период вылета вихрей и расстояние между ними сокращаются, если увеличиваются скорость и продольный градиент скорости воздушного потока. В этом случае растет число вихрей, образующихся в единицу времени, что приводит к увеличению скорости испарения.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости $c(u)$, включающие весь исследованный диапазон скорости ветра $0,68 < x < 7$ м/с. При $u < 3$ м/с зависимость $c(u)$ – линейная функция скорости ветра.

В соответствии с данными рис. 3, в открытом канале скорость испарения выше, чем в канале, частично накрытом крышей. Сравнение данных, полученных при $u < 3$ м/с (нет регулярных ветровых волн) в сужающемся и расширяющемся каналах, показывает, что испарение в расширяющемся канале выше, что обусловлено формированием цепочки вихрей.

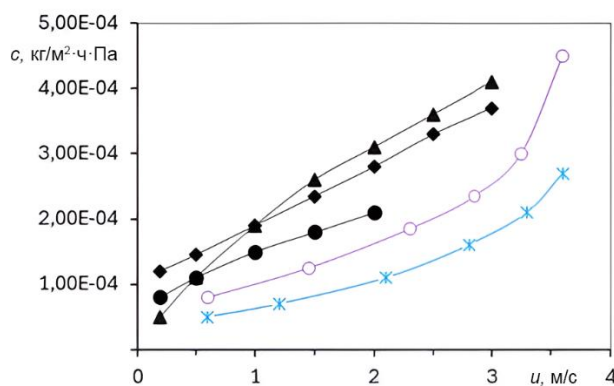


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $c(u)$: линия с прозрачными кружочками – для открытого канала, с крестиками – для канала с крышей (аппроксимация сплошной линией); линия с треугольниками – данные из работы [19], с ромбами – из работы [21], с темными кружочками – из работы [26]

Fig. 3. Experimental $c(u)$ dependencies: line with transparent circles shows the open channel, with crosses – the channel with roof (solid line marks approximation); line with triangles denotes the data from [19], with diamonds – from [21], and with dark circles – from [26]

Приведенные данные позволили сравнить зависимость $c(u)$ с рядом эмпирических формул и экспериментальными данными других авторов для плоской поверхности воды при условии $u < 3$ м/с [19–21, 26]. Для всех исследований были получены близкие к линейным зависимости $c(u)$, как и в формулах (1), (2). Данные имеют большой разброс [27]. Коэффициент испарения в наших

экспериментах меньше по сравнению с данными других авторов, хотя разброс данных лежит в тех же пределах. Снижение обусловлено наличием участка канала под крышей с равномерным продольным профилем скорости. На этом участке испарение вызвано только естественной конвекцией в пограничном слое потока воздуха. Кроме того, еще есть участок на выходе из канала, где скорость ветра быстро снижается за счет трения о стенки, что приводит к снижению скорости испарения.

Во второй серии экспериментов скорость ветра превышала критическое значение, при котором на поверхности воды возникают ветровые волны $u > 3$ м/с [22]. Как следует из данных рис. 3, испарение резко возрастает, так как растет число вихрей, формирующихся в единицу времени в вязком слое воздушного потока. В результате вместо линейной зависимости $c(u)$, полученной при скорости ветра $u < 3$ м/с, появляется сильно нелинейная зависимость $c(u)$ при $u > 3$ м/с.

Следует отметить, что дополнительный вклад в увеличение скорости испарения, обусловленного переносом влаги вихревыми цепочками, вносит диаметр цилиндрических вихрей, составляющий нескольких миллиметров. Скорость испарения воды с капель, имеющих малый размер и большую кривизну поверхности, намного выше скорости испарения с плоской поверхности воды, так как диффузия полностью отводит все молекулы, вылетающие из капель [28].

Заключение

В работе предложена методика исследования процесса испарения с поверхности слоя воды под действием плоскопараллельного потока воздуха в ветро-волновом прямом канале. Использование наклонной крыши над частью канала позволило создать в эксперименте потоки воздуха, скорость которых была однородной вдоль продольной оси канала, и потоки, скорость которых уменьшалась в направлении движения. На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Проведено экспериментальное исследование влияния продольного профиля скорости ветрового потока над слоем воды на скорость испарения.

2. Получено, что в потоках с однородным продольным профилем скорости интенсивность испарения существенно ниже, чем в замедляющемся потоке, так как испарение обусловлено только естественной конвекцией в плоскопараллельном воздушном потоке.

3. Показано, что в замедляющемся воздушном потоке интенсивность испарения возрастает за счет формирования цепочки цилиндрических вихрей в пограничном слое. Вихри формируются у поверхности воды, где влажность воздуха максимальна, и поднимаются в толщу воздушного потока под действием обобщенной силы Жуковского. При этом коэффициент испарения возрастает в полтора-два раза.

4. Дополнительное увеличение скорости испарения возникает при генерации ветровых волн и условии $u > 3$ м/с. Волну обтекает воздушный поток, скорость которого растет над задним склоном и убывает над передним склоном волны. В зоне замедления потока воздуха (зона максимальной влажности) над передним склоном волны формируются цепочки вихрей, которые под дей-

ствием обобщенной силы Жуковского поднимаются в толщу воздушного потока, увеличивая интенсивность испарения. Диаметр вихрей имеет такой же порядок толщины в несколько миллиметров, как и вязкий слой. Скорость испарения с поверхности таких вихрей выше, чем с плоской поверхности слоя воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин Г. Н., Насонов А. Е., Фокен Т. Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 3. С. 367–383. EDN OPJZUL.
2. Панин Г. Н., Гречушников М. Г., Пуклаков В. В. Адаптация модели тепло-массообмена водоема с атмосферой с учетом эффекта мелководий на примере Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 6. С. 753–761. EDN OJHDBF.
3. Benilov A. Yu., Kuznetsov O. A., Panin G. N. On the analysis of wind wave-induced disturbances in the atmospheric turbulent surface layer // Boundary-Layer Meteorology. 1974. Vol. 6. P. 269–285. EDN XPVFPFU. <https://doi.org/10.1007/BF00232489>
4. Китайгородский С. А., Кузнецов О. А., Панин Г. Н. О коэффициенте сопротивления, теплообмена и испарения и расчетах потоков импульса, тепла и влаги над морской поверхностью в атмосфере // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9, № 11. С. 1135–1141.
5. Голицын Г. С., Грачев А. А. Скорости и теплообмен при конвекции в двухкомпонентной среде // Доклады АН СССР. 1980. Т. 255, № 3. С. 548–552.
6. Rusu E., Onea F. Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea // Energy. 2013. Vol. 50. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.044>
7. Гиппиус Ф. Н., Архипкин В. С., Фролов А. В. Сезонный ход испарения с поверхности Каспия с учетом влияния волнения и глубины моря // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 5. С. 86–92. EDN XSERYN.
8. Сапрыкина Я. В., Кузнецов С. Ю., Дивинский Б. В. Влияние процессов нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря на высоту обрушающихся волн // Океанология. 2017. Т. 57, № 3. С. 425–436. EDN YTLWNF. <https://doi.org/10.7868/S0030157417020186>
9. The impact of wind speed on the rate of water evaporation in a desalination chamber / R. Wirangga [et al.] // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2023. Vol. 106, iss. 1. P. 39–50. EDN DFJRGGA. <https://doi.org/10.37934/arfmnts.106.1.3950>
10. Longuet-Higgins M. S. The generation of capillary waves by steep gravity waves // Journal of Fluid Mechanics. 1963. Vol. 16, iss. 1. P. 138–159. <https://doi.org/10.1017/s0022112063000641>
11. Дружинин О. А., Троицкая Ю. И., Ву Т. Ц. Прямое численное моделирование турбулентного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью: эффекты капиллярной ряби // Вычислительные технологии в естественных науках. Методы суперкомпьютерного моделирования. Сборник трудов. Москва : Институт космических исследований РАН, 2017. С. 84–100. EDN YQEIQT.
12. Оценка деформации поверхности воды и песка в ветровом канале / П. Ю. Волков [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37, № 6. С. 834–841.
13. Мельникова О. Н., Ян Х. Устойчивость ламинарного течения на границе равномерного и замедляющегося потоков // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86, № 2. С. 247–251. EDN UECGHE. <https://doi.org/10.31857/S036767652202020X>
14. Novikov E. A. Transformation of a vortex ring, initiated by a downburst, into a horseshoe vortex in the boundary layer // Boundary-Layer Meteorology. 1987. Vol. 38. P. 305–309. <https://doi.org/10.1007/BF00122449>
15. Effects of current on wind waves in strong winds / N. Takagaki [et al.] // Ocean Science. 2020. Vol. 16, iss. 5. P. 1033–1045. EDN REQYDC. <https://doi.org/10.5194/os-16-1033-2020>

16. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions / Y. I. Troitskaya [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2012. Vol. 117, iss. C11. C00J21. EDN GBCOAZ. <https://doi.org/10.1029/2011JC007778>
17. Air Sea Interaction under Hurricane Wind Conditions / Yu. I. Troitskaya [et al.] // *Recent Hurricane Research – Climate, Dynamics, and Societal Impacts* / Ed. A. Lupo. InTech, 2011. P. 247–268. <https://doi.org/10.5772/15385>
18. Среднее поле скорости воздушного потока над поверхностью воды при лабораторном моделировании штормовых и ураганных условий в океане / А. А. Кандауров [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 4. С. 455–467. EDN SHLPGH. <https://doi.org/10.7868/S0002351514040063>
19. *Shah M. M.* Methods for Calculation of Evaporation from Swimming Pools and Other Water Surfaces // *ASHRAE Transactions*. 2014. Vol. 120. Part 2. P. 3–17. EDN YDDVMO.
20. *Tang R., Etzion Y.* Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface // *Building and Environment*. 2004. Vol. 39, iss. 1. P. 77–86. EDN XSABUF. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.07.007>
21. *Smith C. C., Löef G. O. G., Jones R. W.* Rates of evaporation from swimming pools in active use // *ASHRAE Transactions*. 1998. Vol. 104. P. 514–523.
22. *Мельникова О. Н.* Вихри в пограничных слоях тормозящихся потоков воды и воздуха // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2024. Т. 79, № 6. С. 2460901. EDN BSDCRQ. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2460901>
23. *Иванова И. Н., Мельникова О. Н.* Оценка скорости испарения с поверхности воды в ускоряющемся, равномерном и замедляющемся потоке воздуха // *Научная конференция «Ломоносовские чтения». Секция физики. Сборник тезисов докладов*. Москва : Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2025. С. 154–156.
24. *Мельникова О. Н., Показеев К. В., Шабров М. Н.* Генерация ветровых волн вихрями в тормозящихся потоках воздуха // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2017. Т. 81, № 1. С. 102–105. EDN XRBVRP. <https://doi.org/10.7868/S0367676517010185>
25. *Мельникова О. Н., Показеев К. В.* Оценка деформации поверхности воды вихрями в вязком слое горизонтального тормозящегося потока воздуха // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2017. № 3. С. 107–110. EDN ZDWQKD.
26. *McMillan W.* Heat dispersal – Lake Trawsfynydd cooling studies // *Symposium on Freshwater Biology and Electrical Power Generation. Part 1. United Kingdom, Leatherhead : Central Electricity Generating Board*, 1971. P. 41–80.
27. *Орвос М., Сзабо В., Пус Т.* Скорость испарения со свободной поверхности нагретой жидкости // *Прикладная механика и техническая физика*. 2016. Т. 57, № 6. С. 168–179. EDN XQZVLX. <https://doi.org/10.15372/PMTF20160619>
28. Экспериментальное исследование испарения капли жидкости на нагреваемой твердой поверхности / А. А. Семенов [и др.] // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22, № 6. С. 801–804. EDN VILUQX.

Об авторах:

Иванова Ирина Николаевна, доцент кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М. В. Ломоносова, д. 1, стр. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: Q-7915-2018**, **Scopus Author ID: 7201988053**, **ORCID ID: 0000-0001-5177-7694**, **SPIN-код: 2075-2400**, ivair@yandex.ru

Мельникова Ольга Николаевна, старший научный сотрудник кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова (119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М. В. Ломоносова, д. 1, стр. 2), доктор физико-математических наук, доцент, **ResearcherID: A-3322-2014**, **Scopus Author ID: 56976261000**, **ORCID ID: 0000-0002-8096-5093**, **SPIN-код: 6500-4931**, olamel@yandex.ru