

Влияние гидрофобных частиц пыли на скорость испарения с поверхности воды

И.Н. Иванова,^{1,*} О.Н. Мельникова^{1,†}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 19.02.2024; после доработки 01.04.2024; подписана в печать 14.04.2024)

В работе экспериментально исследуется влияние естественной пыли, осаждаемой из воздуха, на скорость испарения с водной поверхности. Эксперименты проводились для неподвижной жидкости без обдува поверхности ветром и слабым ветре, не деформирующей поверхность, при постоянной скорости осаждения частиц. Показано, что скорость испарения является линейной функцией разности давления насыщенных паров у поверхности воды и парциального давления воздушной смеси при температуре и относительной влажности в лаборатории в начале процесса осаждения, когда доля закрытой пылью поверхности воды мала. С увеличением времени осаждения гидрофобные частицы собираются в конгломераты, уменьшая долю открытой поверхности и скорость испарения.

PACS: 47.35.-i УДК: 532.5; 532.6

Ключевые слова: пылевая пленка, гидрофобные частицы, испарение, скорость испарения, давление насыщенных паров, парциальное давление, относительная влажность.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2430902](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2430902)

ВВЕДЕНИЕ

Испарение влаги с поверхности водных объектов один из основных процессов тепло-массообмена в системе вода-воздух. Он оказывает значительное влияние на водный баланс озер, морей и океанов. Несмотря на большое количество существующих расчетных моделей, до сих пор нет какого-либо надежного метода определения скорости и интенсивности испарения с поверхности мелководных озер, водохранилищ, прибрежных зон морей [1]. В работе [2] большое внимание уделяется учету влияния мелководных зон на количество испаряемой влаги в общем водном балансе Каспийского моря. Для таких мелководных водохранилищ, как Рыбинское, межгодовые и сезонные колебания уровня, на который оказывает значимое влияние процесс испарения, приводят к значительным изменениям его площади и объема [3]. Одним из факторов, затрудняющих расчет испарения с прибрежных районов, озер, водохранилищ, может быть загрязнение поверхности, в том числе гидрофобными частицами. Большое количество пыли, образующей сплошное покрытие в сезон цветения на небольших водоемах, может почти полностью подавить процесс испарения.

На границе воздух-вода могут образовываться пленки растворимых и нерастворимых поверхностно-активных веществ, слои мелких твердых частиц, осаждающихся на поверхности воды из возду-

ха. Если эти частицы гидрофобны, то они собираются в конгломераты, меняя площадь испаряющей поверхности. Капиллярное взаимодействие притягивающихся частиц на поверхности жидкости рассматривается в [4, 5]. Это явление получило название «Cheerios эффект» [6], что связано со знаменитыми одноименными хлопьями, которые имеют тенденцию скапливаться на поверхности молока. Данный механизм агрегации вызывает особый интерес, поскольку подобный эффект обнаруживается в естественных системах [7]. В [8] измерения были проведены на плавающих телах, жестко связанных с чувствительными датчиками. Часто используются оптические микроманипуляции для выполнения прямых измерений капиллярных сил между микроскопическими коллоидными частицами на поверхности жидкости [9]. В [10] были представлены прямые измерения капиллярной силы притяжения между парой плавающих макроскопических дисков на границе раздела воздух-вода. В [11] исследовано изменение вязкоупругости поверхности неподвижного слоя воды при осаждении частиц минеральной пыли размером порядка 10 мкм. В [12] рассматривается влияние гидрофобных частиц пыли на поверхности воды на развитие дрейфового течения под действием ветра. В [13] изучается влияние пленки естественной пыли, осаждаемой из воздуха, на генерацию гравитационно-капиллярных ветровых волн. Скорость испарения очень важна для процесса опреснения морской воды, которая является потенциальным источником чистой воды, для таких стран, как Индонезия, где опреснение морской воды для преобразования ее в чистую воду может помочь решить национальные водные

* E-mail: ivair@yandex.ru

† E-mail: olamel@yandex.ru

проблемы [14]. В работе [15] экспериментально исследовалось влияние скорости ветра на скорость испарения морской воды в слое с плоской поверхностью. В [16] изучалось влияние ветровых волн на процесс влаго-энергообмена в ветровом слое у поверхности воды. Однако влияние пыли на важнейший процесс — испарение — до сих пор изучено не было.

Процесс испарения определяется конвекцией в тонком слое воздуха у поверхности жидкости. Конвекция возникает, если насыщенный пар у поверхности воды оказывается легче, чем более сухой воздух в окружающей среде, что приводит к подъему пара за счет сил плавучести. В соответствии с законом Дальтона (1803 г.) скорость испарения E можно описать выражением:

$$E = \beta p(1 - q), \quad (1)$$

где p — давление насыщенного пара при температуре водной поверхности, q — относительная влажность воздуха в лаборатории в долях единицы, а произведение qp — парциальное давление воздушной смеси при температуре и относительной влажности в помещении. Параметр β учитывает влияние физико-химических особенностей жидкости и газа, окружающей среды и обдува поверхности жидкости потоком газа. Эмпирические выражения для определения β находят экспериментально.

Обзор и анализ существующих формул для скорости испарения неподвижной жидкости при обдуве поверхности воды воздухом и без потока воздуха можно найти в [17]. В современных [17] и классических [18] работах обсуждается применение следующей формулы β для расчета скорости испарения при обтекании воздушным потоком плоской поверхности воды в диапазоне значений скорости воздуха $u < 1$ м/с:

$$\beta = a + bu. \quad (2)$$

Согласно [19] выражение (2) не подходит для испарения с поверхности воды без обдува. В ряде работ согласия экспериментальных и теоретических данных удается получить, если положить $\beta = \text{const}$ в формуле (1) при обдуве поверхности воды, в этом случае коэффициент β учитывает и влияние ветра [17]. В некоторых работах согласия данных экспериментов и теории удается добиться только в том случае, если вместо линейной зависимости скорости испарения от дефицита давления в (1) используется нелинейная, обычно — степенная зависимость. Значительные отличия формул (2), установленных в различных экспериментах, позволяют заключить, что могут быть дополнительные факторы, влияющие на испарение помимо скорости обдува воздушным потоком. Существенные отличия появляются при деформации водной поверхности в бассейнах, изменении глубины на мелководьях морей, появлении пленок различной природы на поверхности воды. Одним из таких факторов может быть влияние гидрофобных частиц, осаждающихся на поверхность воды из воздуха.

Приведенные формулы учитывают основные параметры процесса — конвекцию и обдув воздушным потоком, но не учитывают влияние осаждающейся пыли на поверхность воды. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование влияния гидрофобных частиц естественной пыли, осаждающихся на поверхность воды из воздуха, на скорость испарения жидкости. Исследование проведено при условии $p(1 - q) > 0$ для плоской поверхности воды без обдува и при обдуве воздушным потоком, скорость которого не превышала значения, при котором на поверхности воды возникают возмущения.

1. АППАРАТУРА

Задача решалась экспериментально в лабораторном ветро-волновом канале кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Фотография установки приведена на рис. 1.

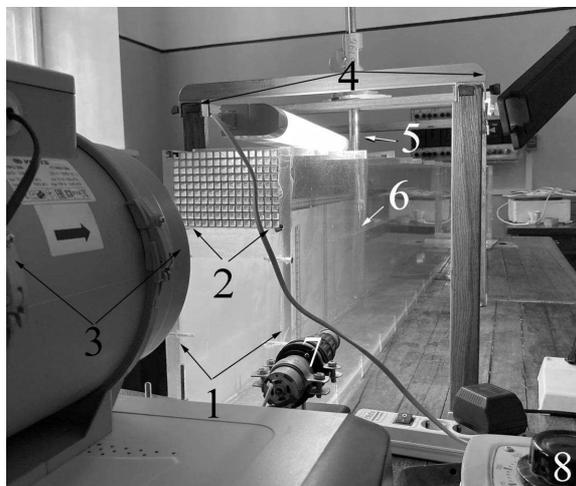


Рис. 1. Установка: 1 — канал, 2 — решетка, через которую подается воздушный поток, 3 — ветрогенератор, 4 — координатная система, 5 — шпигельмасштаб, 6 — мерная игла, 7 — анемометр, 8 — трансформатор

Длина открытого 3.5 м, высота боковых стенок 0.4 м, ширина смачиваемой области — 0.15 м, толщина слоя воды в канале $h = 0.3$ м. На выходе канала сделано прямоугольное расширение до 0.45 м, которое при необходимости обеспечивает гашение волн. На входе в канал установлена решетка параллельных прямоугольных ячеек (2 на рис. 1), площадь поперечного сечения 10^{-4} м², длиной 0.03 м. Высота решетки составляла 0.1 м, ширина — 0.15 м. Воздушный поток подавался ветрогенератором через решетку на вход в канал, обеспечивая плоскопараллельный воздушный поток. Измеритель скорости анемометр CFM 8901 помещался в однородной части вертикального профиля средней скорости воздушного потока. Разрешение 0.01 м/с, точность $\pm 2\%$ от +0.2 м/с. Измерения проводились раз

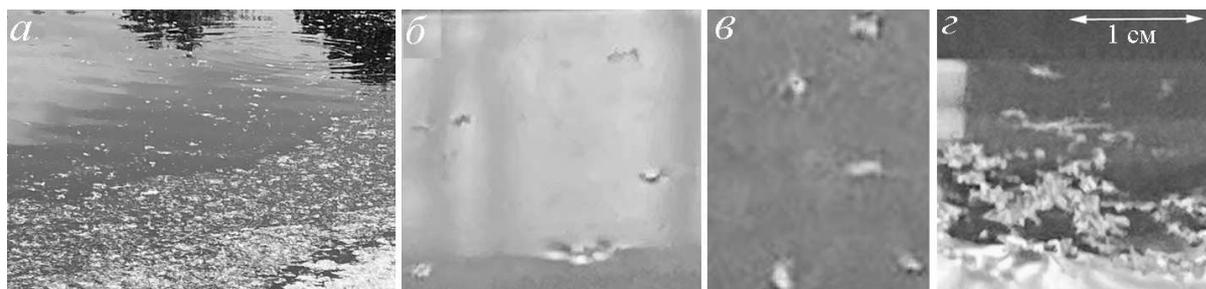


Рис. 2. Частички пыли на поверхности воды: *a* — пруд в безветренную погоду, *б*, *в*, *г* — в лаборатории через сутки, 2 суток и 5 суток после заполнения канала чистой водой

в сутки в течение нескольких минут. Затем прибор удалялся и не возмущал воздушный поток.

Объем воздуха в лаборатории составляет около 198.3 м^3 , объем слоя жидкости в канале составил в общем 0.16 м^3 . Лаборатория посещалась только для проведения измерений, что обусловило постоянство значений основных параметров воды и воздуха в течение эксперимента, кроме первых двух суток, когда вода в канале прогревалась до комнатной температуры. Ежедневно с помощью метеостанции NGY 301A с выносным датчиком проводились измерения температуры поверхности воды и воздуха в лаборатории, относительной влажности воздуха в лаборатории. Погрешность измерений температуры составляла 0.1°C , влажности $\pm 5\%$ от показаний, но не менее 1% . Для определения скорости испарения измерялся уровень воды с помощью мерной иглы шпигельмасштаба, смещение которой определялось по шкале с ценой деления 10^{-4} м . Фотографировалась поверхность воды с частицами осаждающейся пыли. Фотографии позволили приблизительно определить долю поверхности воды, покрытую частицами.

Были проведены две серии экспериментов в одной и той же лаборатории в канале с открытой поверхностью воды. Первая серия экспериментов проводилась в отсутствие воздушного потока, вторая серия экспериментов проводилась при постоянном ветре, скорость которого измерялась с помощью анемометра и составляла 0.68 м/с . При этом значении скорости ветра поверхность воды в канале оставалась невозмущенной.

Каждая серия экспериментов длилась 9 суток. В первый день канал заполнялся водой из водопровода, затем оставался открытым в течение 9 суток. В этих условиях на поверхности воды росло количество пыли, осаждающейся из воздуха.

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛИ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ СВОБОДНОЙ ОТ ЧАСТИЦ ПЫЛИ

В проведенных экспериментах была исследована скорость испарения с поверхности воды при постепенном увеличении концентрации естественной пыли, осаждающейся из воздуха в течение 9 суток. В начале эксперимента экспериментальный канал

заполнялся чистой водой. Фотографии показали, что на поверхности воды в первый день эксперимента наблюдаются отдельные пылинки с характерным размером 10^{-3} м на расстоянии более 10^{-2} м . По фотографиям видно, что пылинки на поверхности воды деформируют водную поверхность, откуда следует, что они являются гидрофобными. С увеличением времени осадения пыли T доля единичной поверхности, занятая пылинками, возрастает.

На рис. 2 приведены фотографии поверхности пруда с большим количеством пыли, образующей сплошное покрытие в сезон цветения (*a*), а также поверхности воды, сделанные через сутки (*б*), через двое (*в*) и через пять суток (*г*) после начала эксперимента. Через двое суток увеличилось число частичек на единичной площадке поверхности воды, а через 5 суток образовались конгломераты гидрофобных частиц. Конгломераты возникают из-за воздействия капиллярных сил при искривлении водной поверхности гидрофобными частицами. Эти силы сближают гидрофобные частицы. Под действием капиллярных сил со стороны искривленной поверхности воды частицы, удаленные друг от друга на расстояние, не превышающее 0.01 м , сближаются. Малый радиус действия силы поверхностного натяжения обуславливает образование конгломератов только при достаточной концентрации гидрофобных частиц. В нашем эксперименте первые конгломераты появлялись на третьи сутки — сначала в виде нитей длиной менее сантиметра. Позже нити сплетались в более обширные образования, как показано на кадре рис. 2, *a*. На рис. 2, *a* приведена фотография поверхности пруда в безветренную погоду. На поверхности видна пыль, концентрация пыли растет слева направо. Видно, что в этом же направлении растет размер конгломератов, а внизу справа образуется сплошной покров водной поверхности. Сравнение фотографий рис. 2, *a* и *б*, сделанных в натуральных и лабораторных условиях, позволяет заключить, что результаты похожи на качественном уровне, несмотря на то, что состав пылинок, конечно, отличался. Однако пыль в обоих случаях состояла из гидрофобных частиц, что обеспечило формирование конгломератов, которые резко увеличивали долю поверхности воды, покрытой пылью.

Фотографии позволили оценить долю поверхности воды, покрытую пылью и, соответственно, долю чистой поверхности $k(T)$ как функцию времени осаждения пыли T . Для каждой серии экспериментов были получены функции $k(T)$. Можно предположить, что испарение жидкости идет только с чистой поверхности воды. Тогда функции $k(T)$ показывают, как уменьшается скорость испарения с единичной поверхности воды в долях единицы. Было установлено, что функции $k(T)$ представляют собой линейные функции времени осаждения. В экспериментах без обдува поверхности воды и при наличии потока воздуха при скорости $u = 0.68$ м/с уменьшение доли чистой поверхности воды описывалось одной и той же функцией:

$$k(T) = 1 - 0.021T. \quad (3)$$

Следует отметить, что совпадение эмпирических функций (3) для экспериментов без обдува поверхности воды и с обдувом, по-видимому, связано с тем, что при такой скорости ветра дрейфовое течение на поверхности воды, которое бы перемещало частицы пыли, в нашем эксперименте не возникло. Линейная зависимость $k(T)$ показывает, что скорость осаждения пыли в эксперименте была постоянна.

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

По определению скорость испарения жидкости определяется объемом или массой испарившейся жидкости с единичной площадки в единицу времени:

$$E = \frac{m}{ST} = \rho \frac{V}{ST} = \rho \frac{h}{T}, \quad (4)$$

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 .

Для определения скорости испарения в экспериментах отметки уровня воды фиксировались один раз в сутки. Изменение уровня поверхности воды определяло толщину слоя h , испарившегося с единичной поверхности за время T (сутки). Порядок величины h в эксперименте составлял десятые доли сантиметра. Для удобства представления результатов была выбрана система СГС, в которой плотность воды при комнатной температуре близка единице. В этом случае удобно представить скорость испарения E как функцию h от параметров процесса. В качестве единицы времени выбраны сутки, так как такой интервал времени совпадает с шагом по времени в эксперименте.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3 приведены экспериментальные значения температуры воды t (сплошные линии) и относительной влажности воздуха q (штриховые линии) в лаборатории как функции времени осаждения пыли для двух серий экспериментов: с ветром и без ветра.

В соответствии с приведенными данными температура воды быстро увеличивалась в первые двое суток при прогреве от 10°C (температура воды в магистральном водопроводе зимой) до комнатной температуры. Влажность уменьшалась от 20 до 10% в эксперименте без ветра, а при наличии обдува влажность уменьшалась в первые трое суток до 12%, а потом практически не менялась. Полученные данные позволили определить давление насыщенных паров у поверхности воды и парциальное давление воздушной смеси при температуре и относительной влажности в помещении. По полученным данным рассчитывалась разность этих давлений $p(1 - q)$, где влажность берется в долях единицы. На рис. 4 приведены зависимости скорости испарения от перепада давления, полученные в экспериментах с ветром (треугольники) и без ветра (кружки). Около маркеров проставлены цифры, обозначающие время осаждения (сутки), в которое получено данное значение в эксперименте. В период $0 < T < 5$ суток происходит быстрый рост температуры воды и разности давлений $p(1 - q)$. На поверхности воды в период $0 < T < 4$ суток фиксируются отдельные частицы пыли и редкие продольные конгломераты в виде «нитей». В этот промежуток времени зависимость скорости испарения от перепада давления может быть аппроксимирована линейной функцией (1), предложенной для чистой поверхности воды без пыли.

Линейная аппроксимация (штриховая линия) для $0 < T < 4$ суток получена как для экспериментов с ветром (5), так и без обдува (6):

$$(\rho h)_{lin} = 0.0014p(1 - q) - 2.021, \quad (5)$$

$$(\rho h)_{lin} = 0.0004p(1 - q) - 0.6123. \quad (6)$$

В соответствии с выражениями (5) и (6) скорость испарения в экспериментах с ветром выше, чем при отсутствии обдува; они отличаются постоянным множителем $\beta = 3.5$. Увеличение скорости испарения при наличии обдува связано с отводом вылетевших молекул воды воздушным потоком. При малой концентрации гидрофобных частиц пыли на поверхности воды (отсутствие конгломератов), скорость испарения представляет собой линейную функцию дефицита давления (5), (6), в которой $\beta = \text{const}$. Величина коэффициента пропорциональна скорости ветра, что совпадает с результатами большого числа экспериментов, выполненных на чистой плоской поверхности воды в лаборатории [17] и в натуральных условиях [20]. В работе [21] приводятся результаты экспериментальных исследований скорости испарения в стоячей

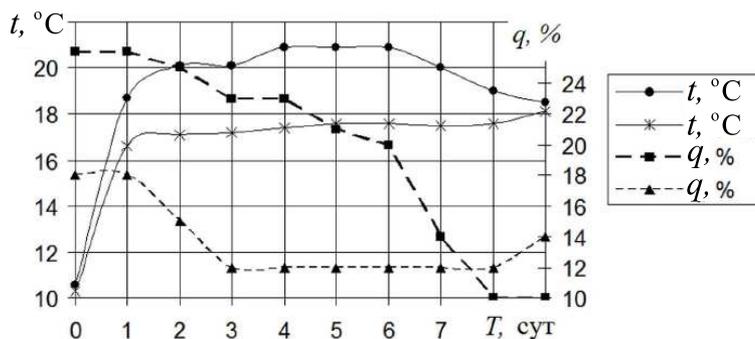


Рис. 3. Изменение температуры воды t (сплошные линии) и относительной влажности воздуха q (штриховые линии) с временем осаждения пыли в экспериментах без ветра (кружки и прямоугольники) и при скорости ветра $u = 0.68$ м/с (звезды и треугольники)

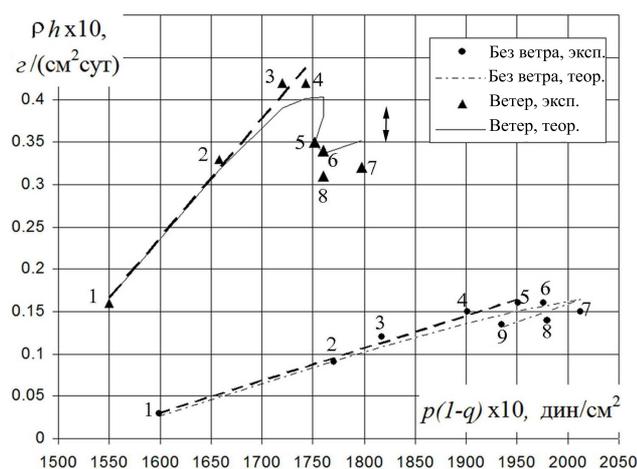


Рис. 4. Зависимость скорости испарения от разности давлений. Маркеры — эксперимент, цифры — время осаждения (сутки). Штриховые линии — линейная аппроксимация экспериментальных данных для $0 < T < 4$ суток. Сплошная и штрихпунктирные линии — расчет по (7). Стрелка — доверительный интервал для доверительной вероятности 0.68

воде без обдува поверхности и при наличии ветра $0.2 < u < 1.9$ м/с. Авторами получено, что при скорости ветра 1 м/с скорость испарения в 3 раза больше, чем при отсутствии ветра. В наших экспериментах скорость испарения при ветре 0.68 м/с в 3.5 раза больше, чем в эксперименте без ветра. Можно считать это хорошим соответствием на качественном уровне, так как в работе нет подробностей о схеме проведения эксперимента и состоянии поверхности воды.

Начиная с 4 сут. экспериментальные данные отклоняются от линейной аппроксимации (5)–(6), полученной для 4 первых суток. Отклонения соответствуют уменьшению скорости испарения по сравнению с линейной функцией. Можно предположить, что уменьшение скорости испарения связано с уменьшением доли свободной поверхности воды без пыли. В соответствии с (3) для $T = 4$ суток площадь поверхности воды без пыли уменьшается

на 10%, что в процентном отношении соответствует уменьшению скорости испарения по сравнению с линейной аппроксимацией. Считая, что скорость испарения пропорциональна доле площади поверхности, свободной от пыли, можно предложить следующее выражение для ее расчета:

$$E = (\rho h)_{lin} k(T), \quad (7)$$

где функция $k(T)$ зависит от времени осаждения пыли T и рассчитывается по формуле (3).

Результаты расчетов, выполненных по (7) с учетом (3), (5), (6), представлены на рис. 4: сплошной линией в эксперименте с ветром и штрихпунктирной линией для эксперимента без ветра. В соответствии с приведенными данными скорость испарения, рассчитанная по (7), хорошо ложится на линейную зависимость в первые трое суток, когда концентрация пыли мала. Начиная с 4 сут. теоретическая кривая отклоняется от линейной зависимости, следуя экспериментальным данным. Отклонения теоретической кривой от данных эксперимента лежат в пределах доверительного интервала для доверительной вероятности 0.68, показанного на графике стрелкой. Это подтверждает правомерность предложенной зависимости (7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследовано влияние гидрофобных частиц естественной пыли, осаждаемой из воздуха, на скорость испарения воды с плоской поверхности вода–воздух. Эксперименты проводились для неподвижной жидкости без обдува поверхности ветром и слабым ветре, не деформирующей поверхность. Скорость осаждения пыли оценивалась по доле единичной поверхности воды, покрытой частицами в зависимости от времени осаждения. Эксперименты показали, что скорость осаждения не менялась при увеличении времени осаждения во всех сериях экспериментов.

Установлено, что в интервале времени осаждения $0 < T < 4$ сут на поверхности воды фиксируются отдельные частицы пыли и редкие продольные

конгломераты в виде нитей. В этот промежуток времени скорость испарения можно аппроксимировать линейной функцией от дефицита давления в приводном слое воздуха. При обдуве скорость испарения возрастает и может быть выражена произведением скорости испарения, полученной в эксперименте без ветра, на постоянный коэффициент.

С увеличением времени осаждения количество частиц пыли на единичной площадке возрастает, а расстояние между частицами уменьшается. В результате оно достигает критического значения, при котором гидрофобные частицы начинают сближаться за счет действия капиллярных сил на поверхности, искривленной гидрофобными частицами. В результате частицы собираются в конгломераты, уменьшая долю открытой поверхности и скорость испарения. Получено выражение (7) для определения скорости испарения с учетом уменьшения свободной поверхности воды при увеличении времени осаждения гидрофобных частиц пыли. Для времени осаждения $T < 4$ суток результаты расчетов по (7) совпадают с линейной аппроксима-

цией (5)–(6). При дальнейшем увеличении времени осаждения $T > 4$ суток для расчета скорости испарения можно использовать выражение (7). Для $T = 4$ суток на поверхности воды появляются конгломераты частиц пыли, а доля чистой воды на единичной площадке сокращается на 10%. Расчеты по (7) показали, что в процентном отношении появляются такие же отклонения скорости испарения с поверхности воды от линейной зависимости.

Результаты работы имеют качественный характер, так как частицы, осаждающиеся из воздуха, представляли собой тип пыли, характерный для данной лаборатории. Характеристики частиц и скорость осаждения изменить было нельзя. Кроме того, влияние ветра показано только при условии, что ветер не деформирует свободную поверхность, т.е. не возникают ветровые волны, существенно влияющие на дрейфовую скорость и перенос примеси. Можно ожидать, что при возникновении ветровых волн при скорости ветра 2–3 м/с формирование покрытия гидрофобных частиц на поверхности воды будет иметь более сложный характер и требует дополнительного исследования.

-
- [1] Панин Г.Н., Гречушников М.Г., Пуклаков В.В. // Водные ресурсы. **38**, № 6. 753 (2011). (A202011). (Panin G.N., Grechushnikova M.G., Puklakov V.V. // *Water Resources*. **38**, N 6. 818 (2011)).
- [2] Гиппиус Ф.Н., Архипкин В.С., Фролов А.В. // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. № 5. 86 (2016).
- [3] Литвинов А. С., Законнова А. В. // Труды ИБВВ РАН, вып. 75(78). 23 (2016).
- [4] Liu I.B., Sharifi-Mood N., Stebe K.J. // *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **9**. 283 (2018).
- [5] Liu J., Li S. // *Eur. Phys. J. E*. **42**. 1 (2019).
- [6] Vella D., Mahadevan L. // *Am. J. Phys.* **73**. 817. (2005).
- [7] Peruzzo P., Defina A., Nepf H. M., Stocker R. // *Phys. Rev. Lett.* **111**. 164501 (2013).
- [8] Rieser J.M., Arratia P.E., Yodh A.G. et al. // *Langmuir*. **31**. 2421 (2015).
- [9] Carrasco-Fadanelli V., Castillo R. // *Soft Matter*. **15**. 5815 (2019).
- [10] Ho lename I., Pucci G., Harris D.M. // *Phys. Rev. Lett.* **123**. 254502 (2019).
- [11] Mazurek A.Z., Pogorzelski S.J. // *Int. J. Oceanography*. Ar.ID 638240 (2012).
- [12] Иванова И.Н. Мельникова О.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. **78**, № 4. 2340902 (2023). (Ivanova I.N., Melnikova O.N. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **78**, N 4. 578 (2023)).
- [13] Иванова И.Н. Мельникова О.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. **78**, № 3. 2330902 (2023). (Ivanova I.N., Melnikova O.N. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **78**, N 3. 410 (2023)).
- [14] Mugisidi D., Heriyani O., Abdel-Rehim Z.S., Fathurohman H. // *In AIP Conference Proceedings*. **1977**, N 1. 030023. AIP Publishing LLC, (2018).
- [15] Wirangga R., Mugisidi D., Sayuti A.T., Heriyani O. // *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. **106**(1). 39 (2023).
- [16] Булгаков К.Ю., Фокина К.В. // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. **14**, № 2. 3 (2021). (Bulgakov K.Yu., Fokina K.V. // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. (2021)).
- [17] Shan M.M. // *ASHRAE Transactions*. **120**, Part 2. SE-14-001. (2014).
- [18] Carrier W.H. // *ASHVE Trans.* **24**. 25 (1918).
- [19] Tang R., Etzion Y. // *Building Environment*. **39**, N 1. 77 (2004).
- [20] Албул И.П. // Вестник СПбГУ. Сер. 7, Вып. 3. 125 (2012).
- [21] Орвос М., Сзабо В., Пус Т. // *Прикладная математика и техническая физика*. **57**, № 6. 168 (2016).

Effect of Hydrophobic Dust Particles on the Evaporation Rate from Water Surface

I.N. Ivanova^a, O.N. Melnikova^b

Department of Physics of Sea and Inland Water, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

E-mail: ^aivair@yandex.ru, ^bolamel@yandex.r

In the paper, the effect of natural dust deposited from the air on the evaporation rate from the water surface is experimentally investigated. Experiments were conducted for stationary liquid without wind blowing across the surface and with mild wind that does not deform the surface, at a constant rate of particle deposition. It is shown that the evaporation rate is a linear function of the difference in the saturated vapor pressure at the water surface and the partial pressure of the air mixture at the temperature and relative humidity in the laboratory at the beginning of the deposition process, when the proportion of the surface covered with dust is small. With the increase in deposition time, hydrophobic particles gather into conglomerates, reducing the proportion of the exposed surface and the evaporation rate.

PACS: 47.35.-i

Keywords: dust film, hydrophobic particles, evaporation, evaporation rate, saturated vapor pressure, partial pressure, relative humidity.

Received 19 February 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 3. Pp. .

Сведения об авторах

1. Иванова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: ivair@yandex.ru.
2. Мельникова Ольга Николаевна — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: olamel@yandex.ru.