

А. М. МХИТАРЯН, Г. Г. ПАХЧАНЯН, А. Г. ЛАЗАРЯН

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОНОСЛОЕВ—ДЕПРЕССОРОВ ИСПАРЕНИЯ

В в е д е н и е

Проблема сокращения потерь воды на испарение с поверхности водоемов и озер является актуальной и имеет важное народнохозяйственное значение, особенно для южных засушливых районов нашей страны.

Сэкономленные воды, наряду с естественными водными ресурсами, могут найти комплексное применение в сельскохозяйственном производстве, энергетике, в водоснабжении промышленных объектов, городов, населенных пунктов и др.

Исследования показывают, что изменение испарения в сторону его уменьшения связано с уменьшением ветра, турбулентного обмена и температуры поверхности воды или с увеличением влажности воздуха.

Возможны три наиболее реальных способа воздействия на испарение. Первый способ основан на периодическом изменении глубины водоема. Для этого необходимо добиваться резкого увеличения глубины летом и резкого ее сокращения зимой [7]. Такое регулирование глубины приведет к сокращению испарения летом и почти к его прекращению зимой. Но практически добиться такого большого изменения глубины почти невозможно. Некоторое такое регулирование возможно лишь для искусственных больших водохранилищ на реках. Но режим этих последних часто диктуется другими энергэкономическими соображениями, а испарение с их поверхности далеко не всегда имеет решающее значение.

Второй способ, связанный с понижением температуры воды, может быть реализован покрытием поверхности специальными веществами, не мешающими биологической жизни в водоеме, но обладающими способностью увеличивать отражающие свойства водной поверхности, так называемое альbedo. Расчеты показывают [8], что увеличение альbedo от 5 до 20% сокращает испарение лишь на 5—8% при одинаковых условиях. Но все дело заключается в том, что при искусственном увеличении альbedo прочие условия не останутся одинаковыми. В частности, это приведет к уменьшению температуры воды, и сокращение испарения будет более существенным. Следует

отметить, что в этом направлении почти никаких работ не ведется, лишь в работе М. И. Будыко [1] этот способ рассматривается для возможности изменения режима ледников путем уменьшения альбедо, то есть увеличения поглощенной радиации.

Существует, наконец, еще один способ уменьшения испарения. Заключается он в покрытии водной поверхности так называемыми мономолекулярными слоями из поверхностно-активных веществ или жирных спиртов, которые способны сокращать испарение в значительной степени [2, 4—8].

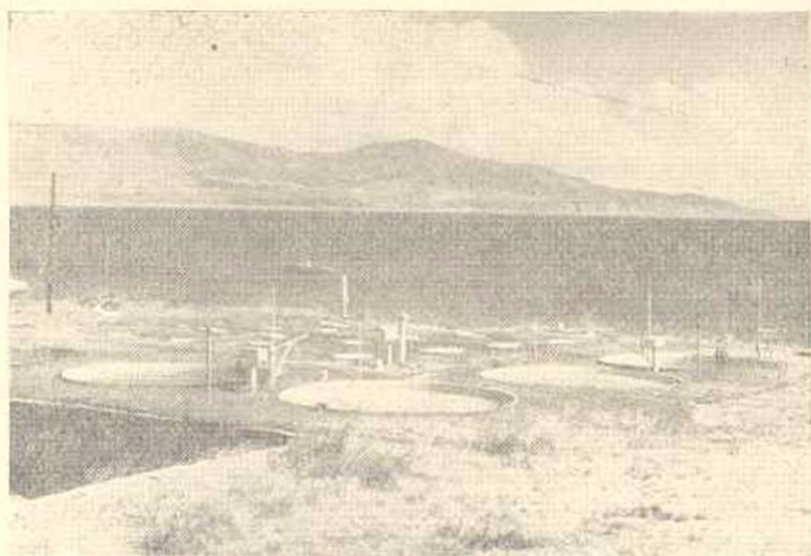
Научно-исследовательские работы по борьбе с испарением с помощью мономолекулярных слоев в СССР были начаты в 1960 г. В том же году осенью были начаты исследования в Армении, в ИВП АН Армянской ССР.

В это же время И. В. Егизаров начал издавать ряд сообщений [2] о работах, проводимых за рубежом. В этих сообщениях приведен большой список опубликованных статей по данному вопросу.

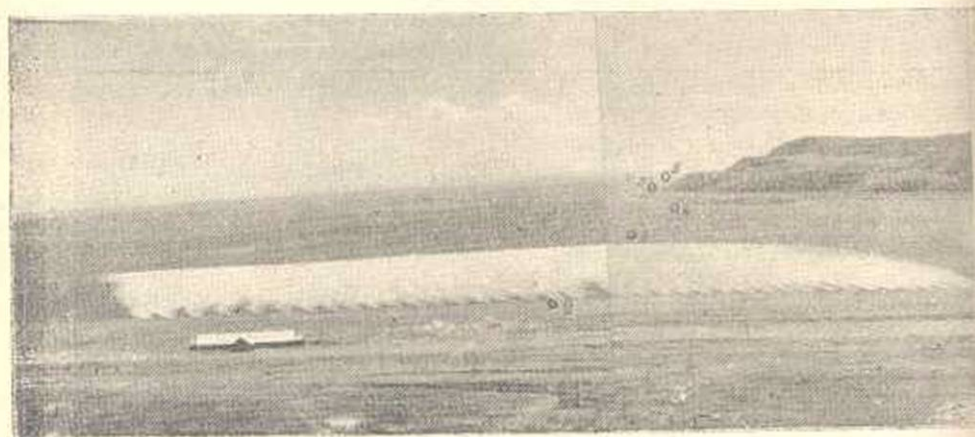
Первые работы в Армении проводились совместно с Всесоюзным научно-исследовательским институтом гидротехники и мелиорации. Результаты работ опубликованы [3—7]. Целью этих исследований было выяснение эффективности монослоев из различных спиртов по сокращению испарения с поверхности испарителя в условиях берега оз. Севан. Научно-исследовательские работы 1931—1934 гг. проводились более широким фронтом.

Во-первых, на водно-испарительной площадке проводились испытания новых, главным образом, отечественного производства монослоев. Изучался тепловой баланс воды в испарителях при налитии пленки и без нее. Проводились и другие работы. Во-вторых, в натуральных условиях на Артанишском реликтовом озере, площадью $0,45 \text{ км}^2$, проводились работы непосредственно по сокращению испарения. В открытой лаборатории института был создан забетонированный бассейн площадью 650 м^2 (50×13) и глубиной $1,4 \text{ м}$. Бассейн снабжен с одного конца специальным волнопродуктором, на другом конце установлен специальный аэродинамический стенд, дающий возможность создавать волны высотой до $10\text{--}15 \text{ см}$ и воздушный поток со скоростью до $3\text{--}5 \text{ м/сек}$ на высоте несколько десятков сантиметров над водной поверхностью. На этом бассейне проводились испытания пленок на сопротивляемость ветру и волнениям [3].

И, наконец, в 1934 г. проводились работы по созданию пленочных ковров площадью до $4\text{--}8 \text{ км}^2$ на оз. Севан с помощью специальных автоматов, установленных на берегу Артанишской бухты. Результаты этих работ можно найти в отчетах института за 1933—1934 гг. (В. Н. Жамагорцян, Б. И. Бек-Мармариев, А. Г. Лазарян и др.), а также в [3—7]. Краткое описание водно-испарительной площадки можно найти в [3—6]. На фиг. 1 показан общий вид водно-испарительной площадки, на фиг. 2—ковер монослоя из вторых неомыляемых спиртов на оз. Севан.



Фиг. 1. Общий вид Арташатской ветро-испарительной площадки.



Фиг. 2. Ковер пленки на Арташатской бухте.

Ниже излагаются результаты работ, выполненных под руководством А. М. Мхитаряна. А. Г. Лазаряном проведены экспериментальные работы, он участвовал также в обработке данных экспериментов (§ 2). Г. Г. Пахчанян принимал участие в разработках §§ 3 и 5 и в некоторых расчетах.

§ 1. Некоторые результаты опытов

Опыты показывают, что жирные спирты, типа гексадеканоль, октадеканоль и другие, практически не растворимы в воде и образуют на ее поверхности бесцветные пленки толщиной в одну молекулу. Молекулы с водолюбивой частью притягиваются к воде, уста-

навливаются в ряд в вертикальном положении дискрето. Такое расположение молекул и создает мономолекулярную пленку.

Эффективность защиты водной поверхности от испарения монослоем зависит от физических свойств вещества и, прежде всего, плотности пленки, характеризуемой двухмерным давлением [9].

Пленка не препятствует проникновению в воду света и кислорода, не нарушает нормальной жизни водоема и, вместе с тем, сокращает испарение. По физическим свойствам пленка эластична, упруга, повторяет формы свободной поверхности воды и быстро восстанавливается после разрывов.

Как указывалось выше, эффективность монослоев зависит от двухмерного давления в слое. Для измерения этого давления применяется модернизированный для работы в полевых условиях вариант прибора А. А. Трапезникова [9]. Кроме того, в опытах 1961—1964 гг. применялся набор индикаторов, рассчитанных на определение двухмерного давления в пределах 0,1—29,2 *дин/см* [3].

Опыты показали, что сокращение испарения составляет от 10 до 62%. Достаточно эффективными оказались пленки из цетилового спирта и спиртов из кашалотового жира и вторых неомыляемых.

Температура воды под пленкой оказалась выше на 1—3°C. Сокращение испарения за отдельные дни при малых скоростях ветра доходило до 90% и более. Некоторые пленки образуются за несколько минут.

Опыты показали, что при разовой подаче химиката наиболее эффективное сокращение происходит в течение некоторого времени, названного нами продолжительностью эффективности пленки. Далее процент сокращения испарения резко уменьшается. Увеличение расхода вещества при малых его значениях приводит к довольно заметному росту процента сокращения и продолжительности эффективности пленки. Дальнейшее увеличение расхода химиката приводит к незначительному их увеличению [4, 5].

Проводились и другие опыты, например, для выбора способа подачи химиката одно и то же количество химиката подавалось сразу на определенный промежуток времени и в различных дозах ежедневно, через 3 дня, 5 дней и т. д. [4].

На основании полученных результатов сделан ряд выводов и, прежде всего, о том, что монослой из отечественного химиката-вторых неомыляемых спиртов довольно эффективен.

Монослой этот применялся в натуральных условиях в целях сокращения испарения с поверхности Арганишского озера, уровень которого поддерживается на определенной отметке с помощью насосной установки, которая перекачивает воду из оз. Севан [3].

Сокращение испарения с поверхности озера составляло около 15%, что следует признать вполне эффективным, тем более, что озеро

находится в трудных условиях, при которых сильные скорости ветра направлены по его малой оси и почти за 30—40 минут сгоняют пленку к противоположному берегу. Наблюдения показали, что скорость дрейфа пленки примерно в 25—30 раз меньше скорости ветра на высоте 2 м. Заметное перемещение пленочного ковра начинается при скорости ветра порядка 3,5—5 м/сек [3].

Наиболее важный результат заключается в том, что если с увеличением скорости ветра испарение с поверхности чистой воды увеличивается прямо пропорционально первой степени скорости, то при наличии пленки этот рост происходит быстрее. Это означает, что если испарение при малых скоростях сокращается в значительной степени, то с ростом скорости ветра, следовательно, и испарения, процент сокращения уменьшается, а при некотором значении скорости ветра вовсе прекращается. При дальнейшем увеличении скорости ветра испарение с поверхности воды под разрушенной пленкой даже становится больше, чем с поверхности чистой воды из-за разности температур [6, 7].

§ 2. Об определении испарения при наличии монослоя

Прежде чем перейти к изложению метода определения испарения при наличии пленки, отметим, что в [1] приведены соображения об эффективности монослоев при их применении в большом масштабе. Поэтому наряду с другими методами в этой работе применение монослоев на арктических морях рассматривается как средство повышения температуры воды, а следовательно, и воздуха. Воздействие этих факторов на льды Арктики способствовало бы таянию льдов и задерживало бы их разрастание.

В работе [8] М. П. Тимофеев решил задачу в зависимости от свойства пленки и гидрометеорологических характеристик водоема. Формула испарения при наличии пленки по М. П. Тимофееву имеет следующий вид

$$E_n = \frac{bu(e_n - e)}{1 + bu/\beta} \quad (2.1)$$

Здесь β — величина, пропорциональная коэффициенту аккомодации [8]. В естественных условиях, при отсутствии пленки $bu/\beta \ll 1$, поэтому формула принимает обычный вид, при этом $e_n \rightarrow e_0$, где e_0 — упругость насыщения, определяемая по температуре поверхности воды в отсутствии пленки.

Для роста температуры воды под пленкой и сокращения испарения автором получены соответствующие формулы [8].

На основании этих исследований автор [8] пришел к выводу о том, что с ростом скорости ветра эффективность монослоя увеличивается. Результат этот был бы точным, если бы пленка сохраняла

свою сплошность и двухмерное давление при больших скоростях ветра, тем более, что эффективность пленки повышается с увеличением испарения в естественных условиях, а это последнее прямо пропорционально скорости ветра.

Все дело в том, что с увеличением скорости ветра способность пленки сопротивляться испарению ухудшается, а при некотором ее значении пленка вообще разрушается и становится неэффективной.

Скорость ветра, при которой происходит разрушение пленки, и последняя перестает сопротивляться испарению, назовем критической. Опыты показали, что эта скорость зависит в основном от вида пленки.

Обозначим через E_0 скорость испарения с поверхности чистой воды при температуре T_0 и упругости насыщения e_0 , через E'_0 испарение с поверхности чистой воды при температуре воды под пленкой T_n и влажности насыщения e_n , определяемой по T_n , и, наконец, через E_n испарение с поверхности воды при наличии пленки при температуре T_n и влажности e'_n , отличной от e_n .

$$E_0 = a(b + v)(e_0 - e_2), \quad (2.2)$$

$$E'_0 = a(b + v)(e_n - e_2), \quad (2.3)$$

$$E_n = a(b + v)(e'_n - e_2), \quad (2.4)$$

причем все эти формулы написаны, например, для одного и того же испарителя. Собственно, две первые формулы совпадают, такая запись лишь подчеркивает разницу в температурах чистой воды.

Возможность такой записи, когда ветровой фактор для всех случаев совпадает, была обоснована в работе [7]. Физически это понятно, ведь величина $a(b + v)$ учитывает конструктивные особенности испарителя и внешние факторы, такие как турбулентное перемешивание в приземном слое воздуха, которые, конечно, не зависят от условий опыта на испарителях.

Введем следующие понятия

$$\Theta = 1 - \frac{E_n}{E_0}; \quad \Theta' = 1 - \frac{E'_n}{E_0} \quad (2.5)$$

Так как $T_n > T_0$, по (2.3) и (2.4) будем иметь $E'_0 > E_0$, то есть $\Theta' > \Theta$. Здесь Θ' — некоторая фиктивная экономия испарения за счет пленки, если испарение пленки отнести к испарению с поверхности чистой воды не при естественной температуре ее поверхности, а при температуре, равной температуре воды под пленкой.

Синхронные наблюдения на одинаковых испарителях с монослоями и без них [3—7] дают возможность измерять величины: E_0 , E_n (следовательно, и Θ , Θ'), T_0 , T_n , e_0 , e_n , а также e и T воздуха. Одновременно для каждой пленки определяется критическая скорость ветра $v_{кр}$.

Группируя затем полученные данные по интервалам скорости ветра, отнесенной к $v_{кр}$, полученные данные осреднялись и наносились на график в логарифмической шкале. Для одного и того же вещества точки ложатся на прямую. В обычной шкале уравнение имеет вид

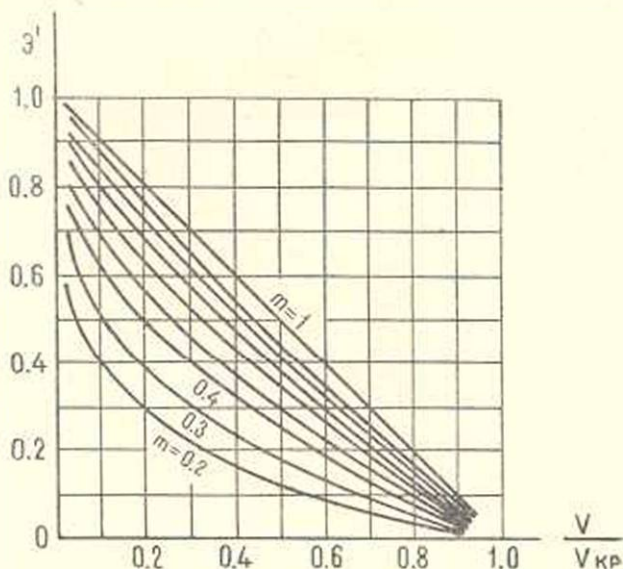
$$\Xi' = 1 - \frac{E_n}{E_0} = 1 - B \left(\frac{v}{v_{кр}} \right)^m. \quad (2.6)$$

Уравнения этих прямых выводились по способу наименьших квадратов, в самом худшем случае разброс точек все же не очень большой, коэффициент корреляции изменяется от 0,65 до 0,9.

Величина B изменяется от 1 до 1,05, в среднем $B = 1,02$ и учитывает то обстоятельство, что при $v > v_{кр}$ некоторое время имеет место $E_n > E_0$.

Если такую же зависимость построить для величины E_n/E_0 , оказывается $B = (1,06 - 1,12)$. Это и понятно, так как при $v > v_{кр}$ имеем $E_n > E_0$.

Зависимость (2.6) представлена на фиг. 3.



Фиг. 3. Зависимость эффективности монослоев от скорости ветра.

Для лучших спиртов $m = 0,8 - 0,9$, для малоэффективных $m = 0,2 - 0,3$. Например, для гексадеканоля и спиртов из кашалотового жира $m = 0,85$. Для чистой воды $m = 0$. Соотношение (2.6) показывает, что чем больше m , тем меньше E_n/E_0 , следовательно, больше Ξ' , так как $v/v_{кр} < 1$. Опыты на испарителях (20 м² площади) дали возможность определять эти параметры для некоторых видов пленок.

Для лучших из них $v_{кр} = 8 - 10$ м/сек. Для спиртов из вторых неомыляемых получено $v_{кр} = 7,5 - 8$ м/сек.

Имея экспериментальные данные о величинах m и $v_{кр}$, определяемых физическими свойствами самой пленки и гидрометеорологическими условиями, легко теперь проводить расчеты испарения в естественных условиях при наличии пленки, то есть определить по сути дела e'_a .

Разделяя (2.4) на (2.3) и пользуясь (2.5), получим

$$e'_a = e_2 + (e_a - e_2) \frac{E_a}{E_0} \quad (2.7)$$

Отметим, что e_2 — влажность воздуха: E_a/E_0 — определяется по фиг. 3; e_a — по температуре поверхности воды под пленкой. Имея e'_a , легко по (2.4) рассчитать испарение при наличии пленки.

Можно было бы весь расчет отнести к E_a/E_0 , построив зависимость, подобно фиг. 3. Тогда в расчет вошла бы величина e_0 , соответствующая температуре поверхности чистой воды, которая в природных условиях при покрытии водоема пленкой не будет известна. При желании ее можно рассчитать, исходя из уравнения теплового баланса.

Отметим, что проводились опыты по изучению теплового баланса воды в испарителе при наличии пленки. Они, во-первых, показали, что монослой, как правило, не меняют альбедо водной поверхности [4–6], во-вторых, при эффективном сокращении пленки температура воды повышается на несколько градусов в зависимости от величины сокращения испарения. В дальнейшем рост температуры прекращается, хотя сокращение и продолжается. Это означает, что устанавливается новое равновесное состояние, при котором сэкономленное за счет уменьшения испарения тепло тратится на дополнительный теплообмен с атмосферой и грунтом и на некоторое увеличение собственного излучения, особенно ночью.

Объединяя теоретическую формулу М. П. Тимофеева (2.1) и формулу, предложенную А. М. Мхитаряном [7] на основании экспериментальных работ в виде

$$E_a = bv(e_a - e)A', \quad (2.8)$$

получим следующее выражение

$$A' = \left(\frac{v}{v_{кр}} \right)^m = \frac{1}{1 + bv/\beta} \quad (2.9)$$

откуда легко определяется величина

$$\beta = \frac{bv}{(v_{кр}/v)^m - 1} \quad (2.10)$$

Эта формула показывает, что, действительно, β зависит от скорости ветра. При $v = 0$ имеем $\beta = 0$, т. е. $A' = 0$ и испарение под пленкой прекращается. При $v = v_{кр}$ $\beta = \infty$ и $A' = 1$ и, согласно формулам

(2.1) и (2.8) испарение происходит, как с поверхности чистой воды, так как пленка исчезает.

Согласно формулам (2.5) и (2.6), для определения экономии испарения получаем следующую формулу

$$\Xi = 1 - B \left(\frac{v}{v_{кр}} \right)^m, \quad (2.11)$$

для расчетов по которой необходимо знать m и $v_{кр}$.

§ 3. Другой метод определения испарения с водной поверхности и его экономии при наличии на ней монослоя

Подойдем теперь к решению вопроса с несколько другой точки зрения.

Предположим, что испарение сквозь пленку происходит с коэффициентом обмена при наличии монослоя D_n , причем влажность изменяется от e_n , определяемой T_n под пленкой, до некоторой неизвестной влажности e'_n над поверхностью пленки. Это испарение будет определяться формулой

$$LE_n = D_n (e_n - e'_n). \quad (3.1)$$

Далее, испарение в припленочном слое воздуха будет происходить согласно формуле

$$LE_n = \bar{D} (e'_n - e_2), \quad (3.2)$$

где $\bar{D} = D0,622Lp/p$ — коэффициент обмена в обычном смысле, поскольку поток влаги сквозь пленку и далее в атмосферу будет один и тот же. Исключая неизвестную величину упругости пара e'_n , получим

$$LE_n = \left(\frac{D_n + \bar{D}}{D_n} \right) \cdot \bar{D} (e_n - e_2). \quad (3.3)$$

Легко заметить, что справа стоит величина испарения с поверхности чистой воды при температуре T_n , т. е.

$$LE'_0 = \bar{D} (e_n - e_2). \quad (3.4)$$

Объединяя (3.3) и (3.4), получим

$$A' = \frac{E_n}{E'_0} = \frac{D_n + \bar{D}}{D_n}. \quad (3.5)$$

Для определения экономии испарения будем иметь

$$\Xi' = 1 - A' = \frac{E'_0 - E_n}{E'_0} = \frac{\bar{D}}{D_n + \bar{D}}. \quad (3.6)$$

Из этого выражения легко может быть определена величина коэффициента обмена сквозь пленку — D_n , если известна экономия испаре-

ния, и наоборот. Ниже будет показано, как можно определить D_n , тогда легко по (3.6) определить некоторую фиктивную экономию испарения, которая несколько больше, чем фактическая экономия, так как отнесена к испарению E'_0 с поверхности чистой воды при температуре воды под пленкой.

Истинная экономия испарения должна быть определена по формуле (2.5), где E_n определяется по формуле (3.3), т. е.

$$LE_n = \frac{\bar{D}D_n}{\bar{D} + D_n} (e_a - e_2). \quad (3.7)$$

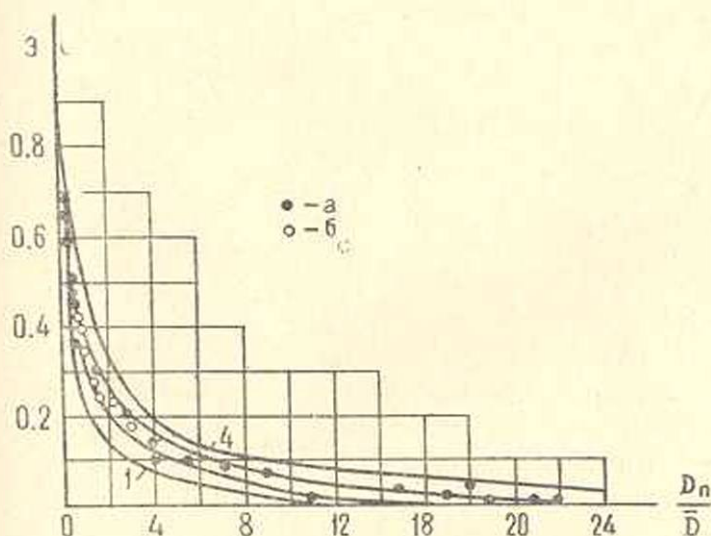
а E_0 — по формуле

$$LE_0 = \bar{D} (e_0 - e_2), \quad (3.8)$$

причем e_0 — упругость насыщения при температуре поверхности воды T_0 , которая имела бы место, если бы не было монослоя. Подставляя (3.7) и (3.8) в (2.5), получим

$$\Theta = 1 - A = 1 - \frac{D_n}{D_n + \bar{D}} \frac{e_a - e_2}{e_0 - e_2}. \quad (3.9)$$

Эта зависимость представлена на фиг. 4.



Фиг. 4. Зависимость экономии испарения от относительного интегрального коэффициента обмена монослоя при $\mu_0 = 0$ (1); $\mu_0 = 0.3$; 1 и $\mu_0 = 7$ (4). На графики нанесены опытные точки. а — Арташис; б — Норк.

Остается определить еще e_0 , т. е. T_0 . К определению этих величин мы вернемся ниже. Имея T_0 , т. е. e_0 , можно по (3.9) найти фактическую экономию испарения.

Если при такой интерпретации испарение при наличии пленки определяется по формуле (3.7), то теплообмен с атмосферой будет определяться по формуле

$$P_n = \frac{c_p \rho}{0,622L} \bar{D} (T_n - T_2). \quad (3.10)$$

Тогда для отношения Боуэна получим

$$\frac{P_n}{LE_n} = \frac{P_0}{LE_0} \frac{\bar{D} + D_n}{D_n}; \quad \frac{P_0}{LE_0} = \frac{c_p \rho}{0,622L} \frac{T_n - T_2}{e_n - e_2}. \quad (3.11)$$

Здесь штрихи обозначают значение элемента в отсутствии монослоя, но при температуре воды под пленкой. В случае, когда $D_n = 0$, это отношение неограниченно возрастает, в случае, когда $D_n \rightarrow \infty$, наоборот, стремится к своему значению при отсутствии пленки.

§ 4. Зависимость повышения температуры воды от величины сокращения испарения

Рассмотрим уравнение теплового баланса водной поверхности при наличии пленки, которое для чистой воды (без пленки) напомним в виде

$$R_0 = LE_0 + P_0 + B_0 + B_r^0. \quad (4.1)$$

При наличии пленки это уравнение примет вид

$$R_n = LE_n + P_n + B_n + B_r^n. \quad (4.2)$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$R_0 - R_n = L(E_0 - E_n) - (P_n - P_0) - (B_n - B_0) - (B_r^n - B_r^0). \quad (4.3)$$

Согласно определению, имеем

$$R_0 = S_0(1 - \alpha) - I_0(1 - cn_0^2) - 4f\sigma\bar{T}^3(T_0 - T), \quad (4.4)$$

$$R_n = S_0(1 - \alpha') - I_0'(1 - c'n_0'^2) - 4f'\sigma'\bar{T}'^3(T_n - T').$$

Здесь R — радиационный баланс; LE , P — затраты тепла на испарение и турбулентный теплообмен; B и B_r — изменение теплосодержания воды и поток тепла в грунт; S_0 — суммарная солнечная радиация; α — альбедо; I_0 — эффективное излучение при безоблачном небе; n_0 — облачность в долях единицы; σ , f — коэффициенты Стефана — Больцмана и излучения; $\bar{T}$ — некоторая средняя температура по абсолютной шкале. Индекс „ноль“ относится к поверхности чистой воды; индекс „ n “ — к поверхности воды при наличии на ней пленки, к ней относятся и „штрихи“.

Очевидно, суммарная солнечная радиация и облачность при наличии пленки и без нее изменяться не будут, т. е. $S_0 = S_0'$ и $n_0 = n_0'$. Далее, как показали опыты, альбедо тоже не меняется, т. е. $\alpha \approx \alpha'$. Предполагая еще, что эффективное излучение при безоблачном небе также не меняется, т. е. $I_0 \approx I_0'$ и $c \approx c'$ и, кроме того, мало

изменение температуры воздуха, что имеет место для малых водоемов, из (4.4) получим

$$R_0 - R_n = 4f\sigma\tilde{T}^3 (T_n - T_0). \quad (4.5)$$

Отсюда получаем первый результат. Радиационный баланс водной поверхности при наличии пленки уменьшается, если только имеет место сокращение испарения, т. е. $T_n - T_0 > 0$.

Поскольку опыты показали, что при наличии пленки формула (3.10) сохраняет вид

$$P_n = c_p \rho D (T_n - T), \quad (4.6)$$

т. е. коэффициент обмена почти не меняется, то можно предположить, что формула (3.7) тоже сохраняет свой вид, только вместо e_n , определяемой T_n , следует писать e'_n , определяемое по (2.7)

$$LE_n = 0.622 \frac{L_p}{\rho} D (e'_n - e). \quad (4.7)$$

Тогда легко получить

$$P_n - P_0 = c_p \rho D (T_n - T_0). \quad (4.8)$$

Считая теперь, что глубина воды в водоеме мала, можно приближенно положить $B_n - B_0 \approx 0$; $B_n^0 - B_0^0 \approx 0$. Кроме того, обозначим еще $E_0 - E_n = \Delta E$. Тогда подставляя все полученные результаты в (4.3), в первом приближении получим

$$L\Delta E = (4f\sigma\tilde{T}^3 + c_p \rho D) (T_n - T_0). \quad (4.9)$$

Принимая $f = 0.95$; $\tilde{T} = 283$; $c_p = 0.24$; $\rho = 1.03 \cdot 10^3 \text{ г/м}^3$; $D = 1 \text{ см/сек}$, для условий оз. Севан будем иметь $4f\sigma\tilde{T}^3 = 0.71 \cdot 10^{-2}$, $c_p \rho D = 1.44 \cdot 10^{-2}$ при одной и той же размерности $\text{кал/см}^2 \text{ мин} \cdot ^\circ\text{C}$.

Отсюда получаем второй результат. Экономленное за счет сокращения испарения тепло тратится на увеличение теплообмена с атмосферой и собственного излучения водной поверхности, причем две трети идет на первый процесс, одна треть — на последний. При этом глубина воды мала и теплообмен с грунтом не учитывается.

Подставляя значения указанных величин в (4.9) и переходя для ΔE к размерности мм/сутки , получим

$$T_n - T_0 = 1.92 \Delta E. \quad (4.10)$$

Рассмотрим теперь влияние глубины (H) и теплообмена с грунтом. Согласно определению, имеем

$$B_0 = c' \rho' \frac{\partial}{\partial t} \int_0^H T' dz; \quad B_1^0 = -c' \rho' k' \left. \frac{\partial T'}{\partial z} \right|_H.$$

Написав такие же выражения при наличии пленки, введя среднюю на вертикали температуру и ее связь с температурой на поверхности,

$$T_{cp} = \frac{1}{H} \int_0^H T' dz; \quad \mu(H, t) = T_{cp}/T_0. \quad (4.11)$$

получим соответственно

$$B_a = c' \rho' \mu H \frac{T_n^* - T_a^*}{\Delta \tau}; \quad B_0 = c' \rho' \mu H \frac{T_0^* - T_a^*}{\Delta \tau}. \quad (4.12)$$

Здесь $\Delta \tau = t'' - t'$ — интервал времени, соответствующий разности $T'' - T'$. За этот промежуток принято $\mu \approx \text{const}$. Обозначив

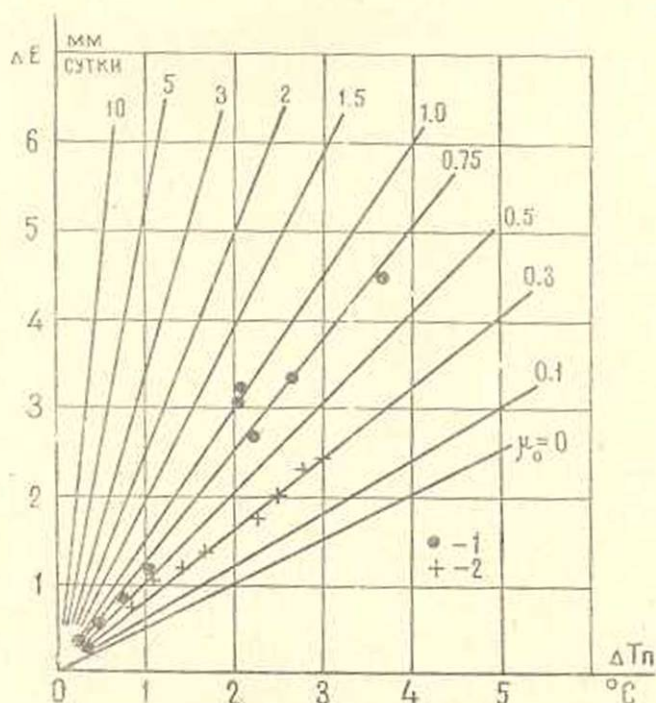
$$\mu_0 = \left(\mu_1 + \frac{c' \rho' \mu H_M}{\Delta \tau_{\text{мин}}} \right) \cdot 0,24 \cdot 10^4, \quad (4.13)$$

согласно основному уравнению окончательно получим

$$\Delta E = (0,52 + \mu_0) \Delta T_a. \quad (4.14)$$

Здесь ΔE берется в мм/сутки, тогда ΔT_a — будет в $^{\circ}\text{C}$.

При $\mu_0 = 0$ получаем (4.10). Зависимость (4.14) для различных значений μ_0 представлена на фиг. 5.



Фиг. 5. Повышение температуры под монослоем в зависимости от уменьшения испарения ΔE и величины μ_0 . 1—Ар-таниш; 2—Норк.

Таким образом, получаем третий результат. При наличии глубины часть эквивалентного тепла расходуется на увеличение собственного излучения, определяемого величиной $0,17 \Delta T_n$; часть — на увеличение теплообмена с атмосферой, равного $0,35 \Delta T_n$ и на увеличение теплоемкости воды и теплового потока в грунт, равного $\mu_0 \Delta T_n$, причем μ_0 определяется по (4.13) при $c' = 1 \text{ кал/см}^3 \text{ град}$; $\rho' = 1 \text{ г/см}^3$; H — в метрах; $\Delta \tau$ — в минутах, тогда μ_0 будет иметь размерность мм/сутки град .

Рассмотрим следующие случаи.

1. $H = 0$ или малая величина. В этом случае $\mu_0 = 0,24 \cdot 10^4 \mu_r$. Подсчеты показывают, что в этом случае на теплообмен с грунтом может расходоваться до 10% эквивалентного тепла. Поэтому при малых глубинах после установления разности температур при продолжающемся сокращении испарения лишь 10% эквивалентного тепла идет в грунт, 90% передается в атмосферу и является как бы чистой эконимией. В дальнейшем, при исчезновении пленки, теплоток с грунта в воду приводит к некоторому увеличению испарения, а также двух других потоков (излучение и турбулентный теплообмен). Таким образом, чистая эконимия составит $\Xi = 0,90 \Delta E + 0,5 \cdot 0,10 \cdot \Delta E = 0,95 \Delta E$. Это означает, что в случае малой глубины почти 95% полученного сокращения передается в атмосферу в виде тепла и теряется навсегда, т. е. является чистой эконимией и лишь 5% этого тепла снова тратится на дополнительное испарение (следствие притока со стороны грунта к воде).

2. Глубина слоя солнца $H \rightarrow \infty$. В этом случае надо рассмотреть три следующих этапа:

а) происходит эффективное сокращение и по формуле (4.14) лишь $0,52 \Delta T_n$ энергии теряется в атмосферу и является чистым выигрышем, часть, равная $\mu_0 \Delta T_n$ идет на исполнение запасов тепла в водной толще и в будущем частично расходуется на испарение.

б) Эффективное сокращение продолжается, профиль температуры воды установился, т. е. прогрев водных масс практически прекратился. Тогда мы переходим как бы к водному без глубины, 90% сокращения является чистым выигрышем, 10% или даже меньше идет на исполнение тепловых запасов грунта. Чем продолжительнее этот период, тем эффективность применения монослоев выше.

в) После некоторого времени пленка исчезает. Тогда часть накопленного в толще воды и грунта тепла идет на теплообмен с атмосферой и увеличивает чистую эконимию этапа а), остальная часть идет на дополнительное испарение и уменьшает первоначальную эконимию испарения. Для определения доли этого дополнительного испарения заметим, что после исчезновения пленки теплообмен с атмосферой и затраты тепла на испарение определяются по формулам (4.6) и (4.7) при $e'_n(T_n)$.

Предположим, что их отношение мало отличается от существующего отношения без пленки. Тогда, согласно результатам работы [7], будем иметь следующие данные для оз. Севан.

Таблица 1

Годовой ход отношения турбулентного теплообмена к затратам тепла на испарение для оз. Севан

Месяц всг.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
P	4,9	3,4	1,2	-0,2	-0,3	0,2	0,4	0,9	1,3	1,9	4,1	5,3	23,1
LE	5,4	4,0	2,3	0,9	0,7	2,2	3,6	5,0	6,8	7,0	6,7	6,3	50,9
P/LE	0,91	0,85	0,52	—	—	0,09	0,11	0,18	0,19	0,27	0,61	0,84	0,45

Ясно, что $T_n - T_2 > T_0 - T_2$, тогда для отношения Боуэна без пленки но при температуре под пленкой, в отличие от (3.11), будем иметь

$$\frac{P_n}{LE_n} = 0,52 \frac{T_n - T_2}{e_n - e_2} = 0,52 \frac{T_0 - T_2}{e_0 - e_2} \frac{T_n - T_2}{T_0 - T_2} \frac{e_0 - e_2}{e_n - e_2}. \quad (4.15)$$

Подставляя сюда значение P_0/LE_0 , а также пользуясь разложением формулы Магнуса

$$e_0 - e_2 \approx d + \psi(T_0 - T_2); \quad e_n - e_2 \approx d + \psi(T_n - T_2), \quad (4.16)$$

легко получим следующую оценку

$$\frac{P_n}{LE_n} = \frac{P_0}{LE_0} \left[\frac{\psi + d/(T_0 - T_2)}{\psi + d/(T_n - T_2)} \right]. \quad (4.17)$$

Поскольку при сокращении испарения имеем $T_n - T_2 > T_0 - T_2$, выражение в квадратных скобках формулы (4.17) будет больше единицы, поэтому $P_n/LE_n > P_0/LE_0$. Это означает, что экономия испарения по данным табл. 1 будет определена с небольшим запасом. При желании можно воспользоваться формулой (4.17).

Таким образом, получаем следующий окончательный результат. Наиболее выгодно применить пленку летом на малых водоемах, когда испарение большое и в последующий беспленочный период заметного дополнительного испарения не будет, так как в период работы пленки тепло почти не будет накапливаться. На глубоких водоемах целесообразно работать в период охлаждения водных масс, когда отношение P/LE — большая величина, и чем больше продолжительность покрытия пленкой, тем выгоднее.

По данным для оз. Севан, например, получается следующая картина. За теплый период года (месяцы III—VIII) имеем: $LE_1 = 20,3 \text{ ккал/см}^2$, $P_1 = 5,3$; $B_1 = 36,4$; $P_1/LE_1 = 0,261$. Соответствующие величины за IX—II месяцы равны: $LE_2 = 29,0$; $P_2 = 19,4$; $B_2 = -36,4$ и $P_2/LE_2 = 0,662$. Если теперь пленкой покрывать в период прогрева водных масс, когда $B_1 > 0$, то в это время небольшая часть сэкономленного тепла теряется в атмосферу, значительная часть накопи-

вается и в последующем снова тратится на испарение. В то же время, если покрывать пленкой в период, когда $B_2 < 0$, то в это время отношение P_2/LE_2 значительно и уже в период работы пленки значительное количество тепла теряется в атмосферу и увеличивает чистую экономию.

На зависимости (3.9) и (4.14), полученные теоретически и представленные на фиг. 4 и 5, нанесены точки по экспериментальным данным, проведенным А. Г. Лазаряном в Артанише (черные кружки) и Б. И. Бек-Мармарчевым и М. И. Тер-Аствацатурян в Норкской лаборатории института (крестики). Результаты хорошо ложатся на график, соответствующей испарителю глубиной 1,5–2,0 м и водоему глубиной 15–18 м. Это и понятно, так как коэффициент обмена в хорошо перемешиваемом водоеме примерно в 10^2 раз больше такого для испарителя, а скорость распространения тепловой волны от поверхности воды в глубокие слои прямо пропорциональна корню квадратному от коэффициента обмена. Поэтому в водоеме глубиной 20 м и испарителе глубиной 2 м тепловая волна доходит до дна за одинаковое время [7].

§ 5. Определение эффективности монослоя

Поскольку эффективность монослоя определяется экономией испарения, выраженной формулой (2.5), постольку для ее вычисления необходимо рассчитать испарение при наличии монослоя за период его эффективной работы (E_n) и испарение с поверхности чистой воды, которое имело бы место за тот же период, если бы не было монослоя.

Испарение при наличии пленки может быть вычислено из (4.2), если подставить сюда (4.6) и (4.12) и считать, что $B_f \approx 0$. Тогда получим

$$LE_n = R_n - c_p \rho D (T_n - T_2) - c' \rho' \mu H \frac{T_n' - T_n}{\Delta \tau}. \quad (5.1)$$

При этом радиационный баланс или измеряется непосредственно или определяется по (4.4). Все остальные величины известны.

Испарение с поверхности чистой воды, которое имело бы место, если бы не было пленки для периода работы пленки, когда фактическое испарение происходило по формуле (5.1), можно определить по формуле (3.8), если бы было известно e_0 , т. е. T_0 . Для определения этих последних воспользуемся (4.14). Получим

$$0,622 \frac{L_p}{p} D (e_0 - e_2) - LE_n = (D_s + D_p + D_B) (T_n - T_0). \quad (5.2)$$

Здесь введены следующие обозначения

$$D_s = 4f\sigma \tilde{T}^3; \quad D_p = \rho c_p D; \quad D_B = \rho_c + c' \rho' \mu H / \Delta \tau. \quad (5.3)$$

В уравнении (5.2) LE_n определяется по (5.1), все остальные величины

известны, кроме T_0 и e_0 . Привлекая еще разложение (4.16), можно определить T_0 и e_0 , а по сути дела определить LE_0 . Получим

$$\Theta = 1 - \frac{E_n}{E_0} = \frac{p}{0,622 L \rho} \frac{D_s + D_p + D_B}{D} \frac{T_n - T_2}{e_0 - e_2}. \quad (5.4)$$

Подчеркнем еще раз, что p , ρ , e_2 — атмосферное давление (5.4), плотность и упругость водных паров; L — скрытая теплота парообразования; величины коэффициентов „обмена“ D , D_s , D_p , D_B известны; T_n — температура воды под пленкой — измеряется; T_0 и e_0 определены из двух соотношений: (5.2) и (4.17), причем

$$T_0 = \frac{(D_s + D_p + D_B) T_n + LE_n - \bar{D}(d - \psi T_2)}{D_s + D_p + D_B + \psi \bar{D}}. \quad (5.5)$$

Здесь $\bar{D} = 0,622 L \rho D / p$, LE_n определяется по (5.1); e_0 — по психометрической таблице при T_0 по (5.5), LE_n может быть определено и по (3.7).

Если LE_n определяется из (5.1), то из (3.7) можно определить коэффициент обмена сквозь пленку

$$\frac{D_n}{\bar{D}} = \frac{LE_n}{\bar{D}(e_n - e_2) - LE_n}. \quad (5.6)$$

Поскольку $\bar{D}(e_n - e_2) = LE'_0$ испарение с поверхности чистой воды при температуре воды под пленкой, то легко видеть, что обратная величина (5.6) является некоторой фиктивной экономией испарения, отнесенной к LE_n , т. е.

$$\frac{D_n}{\bar{D}} = \frac{A'}{1 - A'} = \frac{1}{\Theta'} - 1. \quad (5.7)$$

Таким образом, D_n может быть вычислено по формуле

$$\frac{D_n}{\bar{D}} = \frac{R_n - c_p \rho D (T_n - T_2) - c' \rho' (\mu H / \Delta \tau) (T_n^* - T_n')}{0,622 L \rho \bar{D} (e_n - e_2) / D - R_n + c_p \rho D (T_n - T_2) + c' \rho' (\mu H / \Delta \tau) (T_n^* - T_n')}, \quad (5.8)$$

причем R_n можно вычислить по формуле (4.5) или (4.4).

§ 6. Рекомендации по определению эффективности мономолекулярных пленок

На основании анализа полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований можно предложить следующие практические рекомендации для определения эффективности монослоев.

1. Метод водного баланса. Для применения этого метода водный баланс водоема, который предполагается покрывать пленкой, должен

быть предварительно хорошо изучен. Это тем более необходимо, что для периода покрытия пленкой испарение должно быть определено не только при наличии пленки, но его следует вычислить за прошедший период в предположении, если бы пленки не было. Отсюда можно сделать первый практический вывод. Если точность определения испарения по методу водного баланса известна, то при ожидаемом сокращении испарения следует так выбирать продолжительность эффективного покрытия монослоем, чтобы сэкономленное количество воды в несколько раз превышало указанную точность, тогда фактическое сокращение испарения почти с такой же точностью может быть определено по водному балансу.

Для более мелких и недостаточно изученных водоемов требуется покрывать пленкой в течение нескольких сезонов, чтобы по водному балансу уверенно определить эффективность монослоев.

2. Изучение температурного режима. Для каждого водоема в зависимости от комплекса гидрометеорологических и климатических факторов средняя температура его водных масс из года в год изменяется мало и имеет сравнительно небольшой годовой ход. Отсюда следует, что путем определения этой температуры за сравнительно большие промежутки работы пленки, можно оценить ее эффективность. Этот метод может дать неплохие результаты, особенно если применить его параллельно с изучением водного баланса. Путем сравнения полученных по двум методам результатов можно сделать количественные выводы, так как увеличение теплосодержания водных масс определенным образом связано с сокращением испарения. Отметим, что можно произвести сравнение температур для нескольких характерных для данного водоема вертикалей.

3. Метод теплового баланса. Этот метод подробно рассмотрен в предыдущем параграфе, где показано, что его можно с успехом применить не только для понимания физического механизма процесса сокращения испарения, но и с немалым успехом применить для определения эффективности монослоев.

4. Установление зависимостей различных свойств пленок от гидрометеорологических факторов. Этот метод может быть назван полуэкспериментальным. Один такой пример был продемонстрирован в § 2, когда путем экспериментальных исследований удалось величину сокращения испарения связать с величинами m и $v_{кр}$, характеризующимися природой пленки. Имея данный вид химката со стандартными свойствами, соответствующими тем, которые он имел при экспериментах, можно по полученным связям легко определить сокращение испарения при данной гидрометеорологической обстановке. При экспериментальных исследованиях целесообразно устанавливать зависимости наиболее консервативных характеристик монослоев от метеорологических и иных факторов, чтобы эти связи в натурных условиях не нарушались.

5. Трансформация температуры, влажности и скорости воздушного потока. Опыты показали, что трансформация температуры и влажности воздуха при наличии на водной поверхности монослоя, эффективно сокращающего испарение, количественно происходит иначе, чем в отсутствие пленки.

Проведенные на Артанишской бухте эксперименты показали, что по трансформации влажности воздуха над водоемом при пленке и без нее можно оценить эффективность монослоя по формуле

$$\Theta = \frac{\sigma - 1}{\sigma_{\text{пр}} - 1}, \quad (6.1)$$

где $\sigma = e_2/e_2'$ — рост влажности воздуха на подветренном берегу (e_2) по отношению к влажности на наветренном берегу (e_2'), если бы не было монослоя; $\sigma_{\text{пр}} = e_0/e_2$.

В условиях одного опыта, например, оказалось $\sigma = 1,11$; $\sigma_{\text{пр}} = 1,52$, т. е. $\Theta = 0,21$. В это же время по данным береговых испарительных бассейнов тот же химикат сокращал испарение на 23% , т. е. $\Theta = 0,23$.

6. Можно предложить ряд других методов, например, радиометрических, береговых испарителей и др. Остановимся на последнем. На разных берегах малых водоемов можно устанавливать испарители, из которых испаритель на подветренном берегу примерно показывает то же испарение, что такой же испаритель, установленный на плоту, на акватории озера, если нет монослоя. При наличии монослоя на водоеме эта связь будет нарушена, так как испаритель на плоту будет испарять больше за счет того дополнительного тепла, которое он получает от водоема вследствие повышения температуры воды под пленкой. Путем сравнения данных этих испарителей можно приближенно оценить эффективность монослоя.

Здесь мы не рассматривали вопросы образования монослоев, способов нанесения химиката, определения его нормы и др., имеющие важное практическое значение. Эти вопросы являются предметом специальных исследований.

Ա. Մ. ՄԵԻՏՈՐՅԱՆ, Գ. Գ. ՓԱԽՉԱՆՅԱՆ, Ա. Գ. ԼԱԶԱՐՅԱՆ

ԳՈՒՈՐԾԻԱՅՈՒՄԸ ԿՐԶԱՏՈՂ ՄՈՆԻՏՈՐԱՂԱՆԹՆԵՐԻ
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո ի մ

Ինչպես հարմար է, գործիքուն ունեն հատուկ սպիրտներ, որոնք չբի
մակերևութի վրա ստեղծում են միամոլեկուլյար թաղանթներ: Վերջիններս

որոշ պայմանների առկայության դեպքում արդյունավետ կերպով փոքրացնում են գոլորշիացումը ջրի մակերևույթից: Հոգվածում բերվում են այդ ուղղությամբ արված որոշ փորձերի արդյունքները: Մոնոթաղանթի առկայության դեպքում գոլորշիացումը որոշվում է (2.4) բանաձևով, որն իր տեսքով չի տարբերվում (2.2)-ից: Վերջինս որոշում է գոլորշիացումը ջրի ազատ մակերևույթից, թաղանթի բացակայության դեպքում:

Խնայված ջրի քանակությունը կամ թաղանթի արդյունավետությունը կարելի է որոշել (2.5) բանաձևով, օգտվելով դժ. 3-ից: Այս գծադրի վրա ներկայացված է գոլորշիացման կրճատման աստիճանի փոփոխությունը, կախված քամու արագությունից և թաղանթի ֆիզիկական հատկություններից:

Փորձերը ցույց են տալիս, որ առանձին թաղանթներ պահպանվում են նույնիսկ ուժեղ քամիների աղբյուրի վրա և արդյունավետ կերպով փոքրացնում են գոլորշիացումը: Այդ դեպքում եթե թաղանթի տակ խոնավությունը հազեցած է, ապա անմիջապես թաղանթի վրա, օդում, խոնավությունը հոսու է հազեցածից և, ըստ (2.7)-ի, այնքան շատ, որքան արդյունավետ է թաղանթը:

Մոնոթաղանթների արդյունավետությունը ամենից առաջ կարելի է որոշել ջերմային հաշվեկշռի մեթոդով: Այդ նպատակով օգտագործվում են ջերմային հաշվեկշռի հավասարումները (4.1) տեսքով թաղանթի բացակայության դեպքում և (4.2) տեսքով՝ նրա առկայության դեպքում:

Ջերմային հաշվեկշիռները համապատասխանաբար որոշվում են (4.4)-ից, գոլորշիացումը և ջերմափոխանակությունը՝ (3.7) և (3.11)-ից: Այդ դեպքում արդյունավետության համար ստացվում է (3.9) արտահայտությունը: Գոլորշիացման կրճատման հետևանքով ջրի ջերմաստիճանի աճը որոշվում է (4.14)-ից: Այդ արդյունքները ներկայացված են դժ. 4-ի և 5-ի վրա, որ տեղադրված են նաև փորձնական արդյունքներ:

Ջրի մակերևույթի ջերմաստիճանը թաղանթի առկայության դեպքում չափվում է, իսկ այն ջերմաստիճանը, որը կոչվում է «մակերևույթի անցած մասնակի համար», եթե նրա մակերեսին թաղանթ չլինի, որոշվում է (5.5) բանաձևով:

Հոգվածում համառոտ կերպով դիտարկվում են մոնոթաղանթների արդյունավետության որոշման մի շարք այլ մեթոդներ, ինչպես, օրինակ, ջրային հաշվեկշռի, ջերմաստիճանային ուժի, օդային հոսանքի խոնավության փոփոխությունների և այլն:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Буди́ко М. И. Некоторые пути воздействия на климат. Метеорология и гидрология, № 2, 1962.
2. Егиза́ров И. В. Возможность значительной экономии водных ресурсов для народного хозяйства и одномолекулярная пленка для борьбы с испарением с водной поверхности. Известия АН АрмССР, сер. техн. наук, № 3 и 6, 1960; № 2, 1961.
3. Юбилейный сборник, статьи по монослоям. Известия АН АрмССР, сер. техн. наук, № 2—3, 1963.
4. Лазарья́н А. Г. Опыты применения одномолекулярных пленок для сокращения испарения с водной поверхности. Труды НИИВПиГ МВХ АрмССР, вып. 1, 1965.

5. Макарова В. С., Мхитарян А. М. Опыты по применению мономолекулярных пленок в целях сокращения испарения. Известия АН АрмССР, сер. техн. наук. № 3, 1961.
6. Макарова В. С., Мхитарян А. М., Трапезников А., Федорова Т. Г. Применение мономолекулярных пленок в целях сокращения испарения с водной поверхности. Труды Всесоюз. метеоролог. совещания, 4. Гидрометеониздат, Л., 1961.
7. Мхитарян А. М. Водный и тепловой балансы водоемов и некоторые вопросы гидродинамики пограничного слоя атмосферы. Автореферат диссертации, Л., 1963.
8. Тимофеев М. П. Метеорологический режим водоемов. Гидрометеониздат, Л., 1963.
9. Трапезников А. А., Огаров В. А. Монослой спиртов для снижения испарения с водной поверхности и прибор для измерения двухмерного давления монослоев. Труды ГГИ, вып. 91, 1961.