

## К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ

© 2023 г. А.Н. Салугин

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций  
и защитного лесоразведения РАН*

*Россия, 400062, г. Волгоград, Университетский просп., д. 97. E-mail: saluginan@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2022. После доработки 18.01.2023. Принята к публикации 19.01.2023.

Обсуждены математические методы описания процессов испарения с поверхности почв в условиях субаридной зоны юга России. Произведен анализ теоретических работ в этой области и результаты их практического приложения. Для объяснения натуральных наблюдений использовалось математическое моделирование. Математические модели испарения с поверхности почв разделяются на два типа: физико-математические, обоснованные взаимодействием воды с почвенным каркасом и феноменологические – на балансовых соотношениях. Анализ данных по испарению с поверхностей легких почв произведен с учётом диффузионного и пленочного перемещения влаги в поровом пространстве. При анализе кумулятивного испарения с протяженных территорий использовалась полуэмпирическая модель, связывающая интенсивность испарения с осадками и гидрофизическим состоянием почвенной влаги зоны аэрации. Получено хорошее согласие теории капиллярного передвижения с данными по испарению с поверхности открытых песчаных почв. Выявлена нелинейная связь скорости испарения от толщины подстилающей поверхности и капиллярно-сорбционным давлением. Количество годовых осадков на юге России и кумулятивное испарение связаны между собой степенной зависимостью, указывающей на капиллярно-сорбционную природу испарения.

*Ключевые слова:* испарение, пористость, зона аэрации, градиент давления, влажность, радиус капилляра, математическое моделирование, водный режим почв.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-12-19**

**EDN: DCKJSF**

Испарение в засушливых районах России играет существенную роль в формировании водного режима почв. Следует отметить, что закономерности испарения влаги из почвы изучены недостаточно, являясь актуальными в современной почвенной гидрологии (Черемисинов, 2014; Назари и др., 2020). На протяжении нескольких десятилетий эта проблема решалась в двух направлениях. Для метеорологии, где испарение исследуется как процесс, протекающий в приземном слое атмосферы по данным водного баланса. Детальный анализ работ в этой области приведен в работе А.Р. Константинова (1968). Другое направление принадлежит специалистам почвенной гидрологии, где законы испарения определяются физикой влагообмена в дисперсной среде при движении влаги от грунтовых вод к дневной поверхности (Чураев, 1963; Дерягин и др., 1964; Дмитриев, 1964; Нерпин, Чудновский, 1967, 1975; Van Genuchten, 1980; Schaap et al., 2001; Simunek et al., 2007; Панина, Шеин, 2014; Салугин, Кулик, 2017; Назари и др., 2020). Оба направления в одинаковой степени правомерны и дополняют друг друга при решении общей проблемы испарения. Вместе с тем, они имеют недостатки, связанные с практическим использованием в сельскохозяйственной практике. Имея это в виду, некоторые исследователи (Давыдов, 1947; Лыков, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979) на основе балансовых уравнений с учетом внутрипочвенного переноса исключили из рассмотрения трудно определяемые параметры и получили простые расчетные формулы, которые позволяют вычислять интенсивность испарения с поверхности почвы с достаточной точностью. В водном балансе испарение является одной из главных расходных статей. Сохранение влаги на территориях с её дефицитом является основой рационального использования водных ресурсов. В большинстве работ испарение рассматривалось как одна из статей водного баланса (Константинов, 1968; Лыков, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979; Будаговский, 1981; Шеин,

2005; Гельфан, 2007; Назари и др., 2020). При этом использовалось феноменологическое описание на основе законов балансовых соотношений. Основное внимание уделялось климатическим факторам (температура атмосферы, скорость ветра, влажность атмосферного воздуха, длительность и периодичность осадков и т.д.).

Второе направление (Аверьянов, 1949; Чураев, 1963; Дерягин и др., 1964; Дмитриев, 1964; Лыков, 1968) посвящено теории испарения из капилляров в квазистационарном приближении физики поверхностных процессов. Испарение моделировалось диффузией пара и потоком жидкости за счет градиента почвенного давления (пленочный перенос). Капиллярная модель (Нерпин, 1967, 1975) устанавливает связь между скоростью испарения, толщиной пленки, относительной влажностью воздуха над капилляром и его радиусом. Оказалось, что в мелких капиллярах ( $r < 10^{-6}$  м) испарение выше, чем в крупных ( $r > 10^{-4}$  м).

### Материалы и методы

В настоящей работе испарение изучается в модельном приближении без учета передвижения воздушных масс (ветра) над почвенным горизонтом. Процесс испарения из почвенной толщ рассматривался как изотермический с использованием теорий, приведенных в работах (Дерягин, 1964; Дмитриев, 1964; Нерпин, 1967). Авторы отмечают, что при одинаковой относительной влажности атмосферного воздуха ( $\varphi_0 < 1$ ) испарение протекает с поверхности капилляров по-разному в зависимости от их радиусов. Все капилляры были условно разбиты на два «сорта» – крупные ( $r_1 > 10^{-6}$  м) и тонкие ( $r_2 < 10^{-6}$  м). Для крупных количество испарившейся влаги за единицу времени (скорость испарения) определяется формулой:

$$I = \frac{Dp_sMF(\varphi_1 - \varphi_0)}{RT(x - x_0)} \quad (1),$$

где  $T$  – температура атмосферного воздуха, К;  $F$  – суммарная площадь испарения, м<sup>2</sup>;  $D$  – коэффициент диффузии пара, м<sup>2</sup>/с;  $p_s$  – парциальное давление насыщенного пара, Па;  $M$  – масса грамм-молекулы воды, кг;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;  $\varphi_1$  – относительная влажность воздуха над мениском с радиусом  $r_1$ , отн. ед.;  $\varphi_0$  – относительная влажность атмосферного воздуха, отн. ед.;  $x_0$  – верхняя граница мениска (уровень дневной поверхности), м;  $x$  – опускание мениска капилляра при испарении, м. Относительная влажность воздуха над менисками отличается от атмосферной из-за поверхностного натяжения. Капилляры с большим радиусом введены для того, чтобы оценить влияние плёночной влаги. Авторами этой работы были выявлены три этапа испарения. На первом испарение быстро падает, стабилизируясь, переходя ко второму этапу с постоянной скоростью и большей длительностью по сравнению с первым. На третьем этапе испарение длится до тех пор, пока влажность образца не сравняется с максимальной гигроскопической (МГ). Из теоретических оценок С.В. Нерпина следует, что на практике испарение с легких почв на первом этапе можно рассчитывать по приближенной формуле:

$$I \approx I_0 \left(1 - \frac{nx}{x+x_0}\right) \quad (2),$$

где  $I$  – интенсивность испарения с поверхности мениска, г/ч·см<sup>2</sup>, расположенного на глубине  $x$  от дневной поверхности;  $n$  – доля поверхности, занятой мелкими капиллярами ( $r_1 < 10^{-6}$  м), отн. ед.;  $I_0$  – потенциально возможная интенсивность испарения (испаряемость), г/ч·см<sup>2</sup>. По формуле (2) интенсивность испарения с течением времени падает от  $I = I_0(x = 0)$  до  $I/I_0 = 1 - n = const$ . Установившаяся скорость зависит от соотношения  $n$  между числом крупных и тонких капилляров. С ростом  $n$  скорость испарения падает. В этой модели испарение можно связать с влажностью почвы, которая зависит от степени заполнения водой капиллярного пространства:

$$w = 1 - \frac{nx}{L} \quad (3),$$

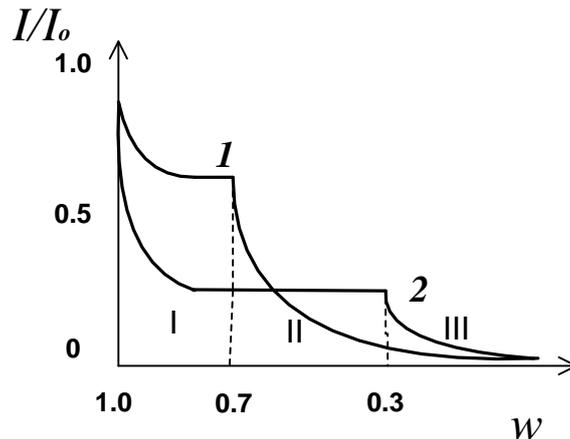
где  $L$  – глубина зоны аэрации, м. Согласно (3), при  $x = L$ , когда капиллярное пространство свободно, потенциально возможная влажность равна  $1 - n = 1 - F_1/(F_1 + F_2)$ .  $F_1$  и  $F_2$  – площади испарения с поверхности мелких и крупных капилляров соответственно. При  $x = 0$  все капилляры заполнены водой и влажность максимальна ( $w = 1$ ). Величину  $n$  в практических приложениях можно связать с объёмом капиллярного пространства, которое в физике почв называется порозностью. В модели (Нерпин, Чудновский, 1975) количественное значение  $n$  содержит в себе информацию о гранулометрическом составе (ГС). После простых преобразований (2) с учетом (3) зависимость

скорости испарения от влажности будет иметь следующий вид:

$$I \approx I_0 \left( 1 - \frac{n(L - wL)}{1 - wL + nx_0} \right) \quad (4).$$

Результаты математического моделирования при таких допущениях показаны на рисунке 1, из которого видно, что существует временной участок, где процесс испарения идет с постоянной скоростью.

Из графиков видно, что область испарения с постоянной скоростью возрастает с увеличением  $n$ . Испарение с дневной поверхности вначале обнажает верхние капилляры, и интенсивность испарения падает, пока не наступит уравновешенный обмен влагой между узкими и крупными капиллярами (Нерпин, Чудновский, 1975).



**Рис. 1.** Зависимость относительной интенсивности испарения от влажности, полученная из капиллярной модели (Нерпин, 1967). Условные обозначения: 1)  $n = 0.3$ ,  $L = 1$ ; 2)  $n = 0.7$ ,  $L = 1$ .

Приведённая капиллярная модель упрощена, т.к. не учитывает усадку почв при высыхании и хорошо «работает» для моделей испарения с лёгких почв. Теоретические графики, представленные на рисунке 1, качественно совпадают с наблюдениями, приведёнными в работе Н.В. Чураева (1963). Модель на таких приближениях позволила выявить фундаментальные положения в понимании механизма испарения из пористых сред. Была установлена зависимость парциального давления от уровня мениска капилляра. Это решает основную задачу почвенной гидрологии – насколько поднимется влага по капиллярной кайме при удалении из нее воды за счет испарения.

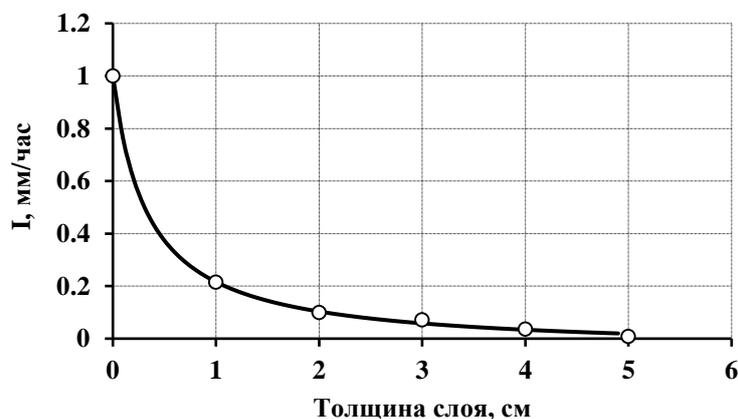
Другой аспект механизма испарения с открытой почвы связан с энергетическим состоянием внутрипочвенной влаги (Шейн, 2005; Grifoll et al., 2005; Bittelli et al., 2008). Некоторые авторы отмечали (Королев, Блудушкина, 2013), что интенсивность испарения зависит от гидрофизических свойств почв, их влажности ( $w$ ) и капиллярно-сорбционного давления ( $P_{к-с}$ ). Обнаруженная в их работе нелинейность между интенсивностью испарения и влажностью обнаруживает обратную связь: при уменьшении влажности за счёт испарения уменьшается скорость испарения. При этом интенсивность испарения  $I$  возрастает с увеличением дисперсности. Объясняя полученные результаты, авторы связывают интенсивность испарения с  $P_{к-с}$ . Экспериментально были выявлены интервалы влажности с одинаковой скоростью испарения. Оказалось, что независимо от гранулометрического состава каждому значению влажности соответствует некоторый диапазон скорости испарения. При этом наблюдается качественное согласие с капиллярной теорией С.В. Нерпина: интенсивность испарения вначале резко уменьшается для грубых фракций, в то время как у высокодисперсных имеется пологий временной участок. Кривые  $I(P)$  показывают, что переход ко второму этапу испарения происходит при НВ и испарение прекращается при МГ. Для давлений  $P_{к-с} > 0.0001$  Мпа испарение аппроксимируется степенной зависимостью  $I(P) = I_0 \cdot P^k$ , где  $I_0$  – интенсивность испарения при давлении 1.0 Мпа,  $k$  – безразмерный коэффициент. Интерпретация кривых  $I(P)$  была затруднена тем, что почвенная влага пребывает в разных энергетических состояниях, которые при испарении изменяются (Чудновский, 1975; Van Genuchten, 1980; Воронин,

1990; Simunek et al., 2007; Нерпин, Салугин, 2018). Переход от одного состояния к другому «размыт» и протекает в некотором диапазоне влажности. Исходя из этого, можно заключить, что полученную ими формулу  $I = I_0 \cdot P^k$  можно использовать для оценки скорости испарения с открытых почв. Физический смысл такой зависимости состоит в том, что энергетическое состояние влаги в почве определяет скорость испарения. Капиллярно-сорбционное давление определяется из кривых влагоудерживающей способности (ОГХ) в виде полуэмпирической зависимости почвенного потенциала от влажности (Van Genuchten, 1980), определяемой почвенным потенциалом из кривой ОГХ. Используя данные по влагоудержанию из кривых ОГХ можно предсказывать интенсивность испарения и, наоборот, определяя динамику испарения, следить за состоянием почвенной влаги.

### Результаты и обсуждение

Теоретические работы и экспериментальные факты использовались многими авторами для расчётов испарения в виде суммы транспирации и физического испарения без разделения этих составляющих, так как оба процесса протекают одновременно (Дмитриев, 1964; Константинов, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979; Будаговский, 1981). При известных атмосферных осадках и склонового стока автор (Кулик, 1979) достаточно точно определил долю физического испарения. Разработанный метод использовался автором на гидрологических площадях с импермацидным горизонтом. По наблюдениям в полевых условиях им была выявлена полуэмпирическая связь физического испарения с влажностью дневной поверхности. При влажности равной ПВ (полная влагоемкость) скорость испарения приближается к испаряемости (скорости испарения с водной поверхности). Летом такое увлажнение на юге России случается редко и реализуется лишь в течение нескольких часов после осадков. При образовании подсушенного слоя интенсивность испарения резко падает. Совершенно очевидно, что процесс испарения – отрыв молекул воды от почвенного каркаса энергетически связан, как отмечалось, со внутрпочвенным (капиллярным) давлением. Исходя из этого, мы обратились к нашим исследованиям по «восстановлению» ОГХ (Салугин, Кулик, 2017; Салугин и др., 2018) с целью их приложения к аппроксимации данных по испарению.

На рисунке 2 показаны теоретическая кривая (2) для аппроксимации данных по испарению, как функции толщины слоя сухого песка на поверхности плодородного слоя из данных работы Н.Ф. Кулика (1979).



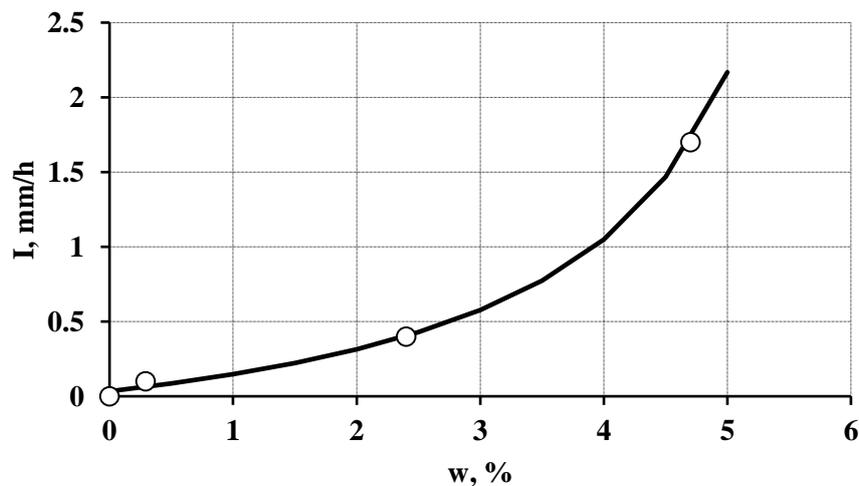
**Рис. 2.** Зависимость интенсивности испарения от толщины слоя сухого песка. Аппроксимация по формуле (2) с параметрами  $I_0 = 1$ ,  $n = 1.047$ ,  $x_0 = 0.336$ .

Из рисунка явствует хорошее совпадение наблюдений с теорией. Аппроксимация кривой осуществлялась методом обобщенной линейной регрессии пакета Matlab. Рисунок отражает хорошее согласие с капиллярной моделью С.В. Нерпина для случая испарения из почвы, покрытой сухим песком. Результат модели демонстрирует влияние мульчирующего слоя и может быть использован в агрономической практике. На открытой дневной поверхности сельскохозяйственного поля после коротких дождей ( $\approx 3$  мм) скорость испарения зависит от увлажнения почвенного горизонта и

скорость испарения снижается.

Таким образом, капиллярная модель в целом ряде случаев удовлетворительно описывает испарение почвенной влаги с учетом отмеченных ограничений. Это позволяет предположить, что полученные зависимости могут быть вполне применимы для практических расчетов и прогнозов испарения из легких почв, имеющих структуру близкую к модельной.

Характерной чертой физического испарения в летний период является его высокая интенсивность в первые сутки после выпадения осадков и резкое снижение в последующие дни. С точки зрения модели С.В. Нерпина, это соответствует первому этапу. В первые сутки испаряется поверхностный слой  $x_0$  с начальной интенсивностью  $I_0$ . Затем испарение падает (рис. 2) по закону  $\frac{I}{I_0} = 1 - n \cdot x / (x + x_0)$ , где  $x$  – толщина сухого слоя. Аппроксимация испарения в зависимости от толщины слоя сухого песка на дневной поверхности достаточно точно описывает наблюдения кривой (2) с параметрами:  $n = 1.047$  и  $x_0 = 0.336$  см. Значение  $n$  больше единицы, что не соответствует действительности, т.к.  $n = F_1 / (F_1 + F_2)$ , где  $F_1$  и  $F_2$  – площади тонких и толстых капилляров. Это может быть связано с извилистостью капилляров, для учета которой необходимо, ввести поправочный коэффициент, о чём указывает автор модели (Нерпин, 1975). К аналогичному эффекту приводит отступление менисков от нулевой отметки дневной поверхности ( $x_0$ ), что уменьшает потенциальную испаряемость ( $I_0$ ). Нелинейная зависимость скорости испарения от накануне выпавших осадков формально описывается формулой (4), подтверждая справедливость капиллярной природы испарения с дневной поверхности. На рисунке 3 показана аппроксимация наблюдений за испарением с открытых песков после выпадения осадков в первые часы. Видно, что формула (4) с параметрами  $I_0 = 0.1289$ ,  $n = 1.174$ ,  $x_0 = 5.619$ ,  $L = 1$  адекватно отражает динамику процесса в первые часы наблюдений после выпадения осадков.



**Рис. 3.** Интенсивности испарения как функция влажности почвы для открытых песков. Аппроксимация по формуле (4) с параметрами  $I_0 = 0.1289$ ,  $n = 1.174$ ,  $x_0 = 5.619$ ,  $L = 1$ .

Данные по испарению, приведённые в работе Н.Ф. Кулика (1979) были детально проанализированы нами с целью получения подходящей аналитической зависимости. Для этого осуществлялась регрессия данных на различные теоретические кривые нелинейным методом наименьших квадратов.

Как отмечалось выше, теоретические исследования испаряемости для почв весьма ограничены. В открытом пространстве при высокой влажности почвы интенсивность испарения описывается формулой:

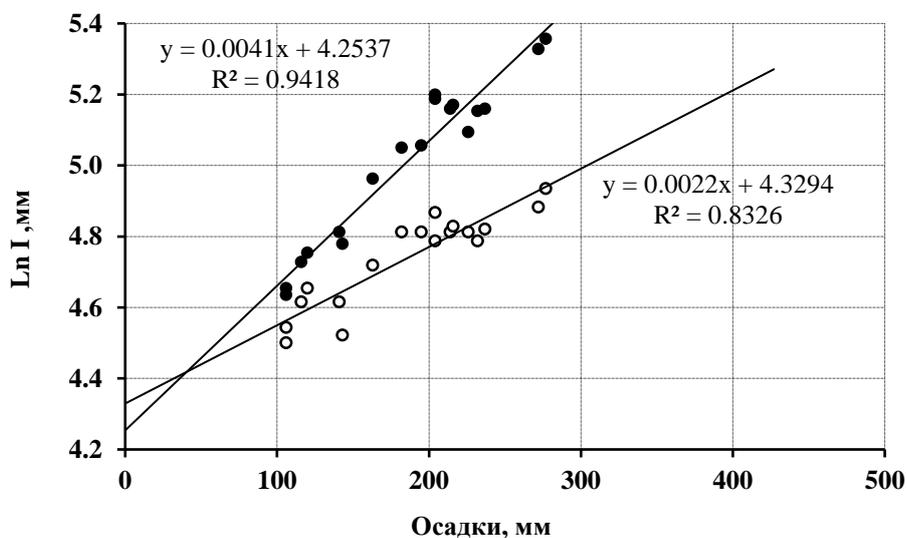
$$I = I_0(1 - e^{-at}) \quad (5),$$

которая является результатом дифференциальной модели:

$$\frac{dI}{dt} = \alpha(I_0 - I) \quad (6),$$

где  $I_0$  – потенциально возможная испаряемость,  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий интенсивность испарения. Модель (6) – феноменологическое описание процессов испарения обратной связью. Величина  $(I_0 - I)$  отражает отклонение текущей скорости испарения  $I$  от потенциально возможной, которая определяется упругостью насыщенных паров. Фактически это дефицит влажности. Чем больше дефицит, тем выше скорость испарения. Из многолетних данных было установлено, что суммарные осадки превышают физическое испарение.

Приведённые формулы были использованы для аппроксимации данных по испарению на песках южных регионов России. Расчет физического испарения по полуэмпирическим формулам за 22 года (1946-1967 гг.) данных восемнадцати метеостанций показал, что испарение возрастает при переходе к районам, где осадки выше. Вместе с тем, доля осадков расходуемых на испарение, возрастает при их уменьшении. Так, например, на Придонских песках на физическое испарение расходуется 110-120 мм, а на Астраханских – 75-90 мм, т.е. по 40-50% и 60-70% от суммы летних осадков соответственно. По многолетним данным (Давыдов, 1947; Константинов, 1968; Лыков, 1968; Лебедев, 1976; Кулик, 1979; Будаговский, 1981; Черемисинов, 2014), осадки, превышая физическое испарение, пополняют почвенный запас воды и увеличивают уровень грунтовых вод. На рисунке 4 представлены результаты аппроксимации данных по годовому физическому испарению (Кулик, 1979) в виде степенной функции от годовых осадков:  $I = I_0 w^k$ . Адекватность аппроксимации очевидна (рис. 4). Эти наблюдения согласуются с результатами работы В.А. Королева и Л.Б. Блудушкина (2013) и подтверждают капиллярную природу почвенного испарения. Отсюда можно заключить, что приведённая модель (5) адекватно описывает наблюдения за балансом влаги на поверхности агроландшафтов.



**Рис. 4.** Зависимость годового физического испарения от годовых атмосферных осадков в полупологарифмическом масштабе. Условные обозначения: чёрные точки – испарение с открытых песков, белые – под пологом леса; с их линейными уравнениями и коэффициентами детерминации. Аппроксимация функцией (5).

Нелинейность процессов перемещения влаги в дисперсных средах в виде степенной зависимости отмечалась многими авторами, как в теоретическом, так и экспериментальном аспектах. Полуэмпирическая модель Ван Генухтена (Van Genuchten, 1980; Schaap et al., 2001; Simunek et al., 2007; Салугин и др., 2017, 2018) связывает ОГХ с их влагопроводностью и способностью отдавать

влагу при испарении. Для влажностей в области ВЗ<sup>1</sup>-НВ ОГХ может быть представлена в виде степенной функции  $I = I_0 \cdot w^k$ , т.к. физическая обоснованность степенной интерпретации очевидна. Законченной теоретической модели испарения в виде аналитического выражения пока нет. Это определяется сложностью механизмов массопереноса в гетерогенных дисперсных средах, создающих энергетически разнообразные состояния внутрипочвенной влаги. Модель С.Ф. Аверьянова (1949) одна из немногих (7) с достаточной физической обоснованностью описывает влагопроницаемость в капиллярах почвенного каркаса. Модель привела автора к степенной зависимости влагопроводности почв  $K$  от влажности в ненасыщенных почвах:

$$K = K_{\phi} \left( \frac{w - w_r}{w_o - w_r} \right)^k \quad (7),$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации (влагопроводность при насыщении),  $w$  – наблюдаемая влажность,  $w_r$  – гигроскопическая влажность,  $w_o$  – влажность насыщения,  $n$  – показатель степени порядка 3.5.

Если говорить о природе и механизмах испарения в целом, то поставленная задача является сложной в теоретическом отношении (Константинов, 1968; Будаговский, 1981). Рассматривая общую теорию испарения, необходимо учитывать множество факторов стохастической природы (климат, неоднородность среды и т.д.). Кроме этого, существенную роль в постановке задачи играют так называемые краевые условия, напрямую связанные с испарением: осадки, ветер, растительный покров, температурный режим и т.д. В настоящей статье приведены результаты исследований по испарению с поверхности почв, которые имеют капиллярное строение зоны аэрации. Из приведенных результатов видно, что нелинейность испарения связана с капиллярной природой процесса. Совпадение теоретических положений С.В. Нерпина с наблюдениями свидетельствует об этом.

### Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что испарение с поверхности почв является процессом удаления влаги с учетом её энергетического внутрипочвенного состояния. В статье были рассмотрены различные по физической природе и степени детализации модели испарения с дневной поверхности. Капиллярная модель основана на способности удерживать влагу капиллярными силами, связана с гранулометрическим составом, определяющим поровое пространство почвы. Испарение в этой модели разбивается на три этапа и может быть использовано для оценки испарения с дневной поверхности легких почв. Балансовые сезонные модели испарения за длительные периоды и на больших территориях основаны на феноменологическом описании. Это интегрированный прием оценки годовых потерь влаги связанных с количеством выпавших осадков. Если процесс испарения в балансовых моделях рассматривать как усредненный по многолетним наблюдениям, то зависимость скорости испарения от влажности следует описывать степенным законом, что позволяет осуществлять прогнозы в динамических задачах водного баланса. Интенсивность испарения в полуэмпирических моделях определяется состоянием почвенной влаги: чем большим капиллярным давлением удерживается вода, тем ниже скорость испарения. Данные по гранулометрическому составу могут быть использованы для оценки испарения влаги с верхних слоев зоны аэрации. Методы математического моделирования при решении задач почвенной гидрологии, одной из которых является задача о сохранении влаги, весьма разнообразны, также как разнообразны цели этих задач. Приведенные в данной работе некоторые обобщения решения задач относятся только лишь к почвенному испарению без учета ветра и солнечной радиации. Получены, на наш взгляд, обнадеживающие результаты с физической интерпретацией наблюдений за испарением, указывают на необходимость более общего подхода к исследованию этого испарения.

*Финансирование.* Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122020100450-9 «Разработка новой методологии оптимального управления биоресурсами в агроландшафтах засушливой зоны РФ с использованием системно-динамического моделирования почвенно-гидрологических процессов, комплексной оценки влияния климатических изменений и антропогенных нагрузок на агробиологический потенциал и лесорастительные условия».

<sup>1</sup> ВЗ – влажность завядания, НВ – наименьшая влагоёмкость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверьянов С.Ф.* 1949. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания воздуха. // Доклад АН СССР. Т. 69. № 2. С.142-144.
- Будаговский А.И.* 1981. Испарение почвенных вод // Физика почвенных вод. М: Наука. С. 13-95.
- Воронин А.Д.* 1990. Энергетическая концепция физического состояния почв // Почвоведение. № 5. С. 7-19.
- Гельфан А.Н.* 2007. Динамико-стахостическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука. 279 с.
- Давыдов Л.К.* 1947. Водоносность рек СССР, ее влияния и влияние на нее физико-географических факторов // Гидрометиздат. Ленинград. 162 с.
- Дерягин Б.В., Нерпин С.В., Чураев Н.В.* 1964. К теории испарения жидкости из капилляров // Коллоидный журнал. Т. 26. № 3. С. 301-307.
- Дмитриев С.И.* 1964. Некоторые закономерности испарения влаги в порах почвы // Труды Ленинградского гидрометеорологического института. Вып 26. С.214-231.
- Константинов А.Р.* 1968. Испарение в природе. Л.: Гидрометеиздат. 590 с.
- Королев В.А., Блудушкина Л.Б.* 2013. Взаимосвязь потенциала влаги в грунтах с параметрами испарения из них влаги // Инженерная геология. № 3. С.22-33.
- Кулик Н.Ф.* 1979. Водный режим песков аридной зоны. Л.: Гидрометеиздат. 277 с.
- Назари М., Чанчи М.Р., Камель Х., Грисмер М., Садеги С.М.М.* 2020. Оценка методов расчёта месячных значений потенциального испарения в аридном климате // Аридные экосистемы. Т. 26. №4 (85). С. 84-92. [Nazari M., Chaichi M.R., Kamel H., Grismer M. & Sadeghi S.M.M. 2020. Evaluation of Estimation Methods for Monthly Reference Evapotranspiration in Arid Climates // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. P. 329-336.].
- Лебедев А.В.* 1976. Методы изучения баланса грунтовых вод. М.: Недра. 223 с.
- Лыков А.В.* 1968. Теория сушки. М.: Энергия. 472 с.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф.* 1967. Физика почв. М.: Наука. 584 с.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф.* 1975. Энерго- и массообмен в системе растение-почва-воздух. Ленинград: Гидрометеиздат. 358 с.
- Панина С.С., Шейн Е.В.* 2014. Математические модели влагопереноса в почве: значение экспериментального обеспечения и верхних граничных условий // Вестник Московского ун-та. Серия 17. Почвоведение. № 3. С. 45-50.
- Салугин А.Н., Кулик А.К.* 2017. Почв: моделирование восстановления водоудерживающей способности // Российская сельскохозяйственная наука. № 6. С. 51-55.
- Салугин А.Н., Кулик А.К., Власенко М.В.* 2017. Влагопроницаемость ненасыщенных почвогрунтов аридной зоны // Российская сельскохозяйственная наука. № 1. С. 21-24.
- Салугин А.Н., Кулик А.К., Власенко М.В.* 2018. Динамика элементов водного баланса в моделях почвенных гидрологических процессов // Российская сельскохозяйственная наука. № 3. С. 47-50.
- Черемисинов А.А.* 2014. Экологическая устойчивость орошаемой системы // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Т. 2. № 3-4 (8-4). С. 494-498.
- Чураев Н.В.* 1963. Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах // Доклады АН СССР. С. 1361-1364.
- Шейн Е.В.* 2005. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ. 432 с.
- Bittelli M., Ventura R, Gaylon S., Campbell G.S., Snyder R.L., Gallegati R, Pisa PR.* 2008. Coupling of heat, water vapor, and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils // Journal of Hydrology. P. 191-205.
- Griffoll J., Gasto J.M., Cohen Y.* 2005. Non-isothermal soil water transport and evaporation // Advances in Water Resources. Vol. 28. Iss. 11. P. 1254-1266.
- Schaap M.G., Leij F.J., Van Genuchten M.Th.* 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // Journal of Hydrology. Vol. 251. P. 163-176.
- Simunek J., Van Genuchten M. Th., M. Sejna.* 2007. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes // Vadose Zone Journal. Vol. 7. No. 2. P. 587-600.
- Van Genuchten, M.Th.* 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Science Society of America Journal. Vol. 44. Iss. 5. P. 892-898.