

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА (НА ПРИМЕРЕ ПЕЩЕРНОГО КОМПЛЕКСА КИЕВО-ПЕЧЕРСКОЙ ЛАВРЫ)**

**А.Б. Ситников**

*Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: geoj@bigmir.net  
Доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией техногенной гидрогеологии.*

На примере пещерного комплекса Киево-Печерской Лавры показаны типичные методические аспекты достоверности исследований теплового переноса. Обращено особое внимание на точность определений измерительных приборов и исходных параметров фундаментальных и упрощенных законов состояния влаги в пещерном пространстве и грунтах.

*Ключевые слова:* достоверность, погрешность, теплообмен, пещерный комплекс, Киево-Печерская Лавра, параметры, математическое моделирование.

## **THE METHODOLOGICAL ASPECTS OF VALIDITY ASSESSMENT FOR HEAT-MOISTURE EXCHANGE STUDIES (AS AN EXAMPLE THE COMPLEX OF KYIV PECHERSK LAVRA)**

**A. B. Sitnikov**

*Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: geoj@bigmir.net  
Doctor of geological-mineralogical sciences, professor, chief of technogenic hydrogeology laboratory.*

The typical methodological aspects of the study validity for heat-moisture transfer are shown as exemplified by the cave complex of Kyiv Pechersk Lavra. The measurement accuracy for the measuring devices and the initial parameters of fundamental and simplified moisture state laws in cave space and soils are emphasized.

*Key words:* validity, error, heat-moisture transfer, cave complex, Kyiv Pechersk Lavra, parameters, mathematical modeling.

## **МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ ДОСТОВІРНОСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОМОЛОГООБМІНУ (НА ПРИКЛАДІ ПЕЩЕРНОГО КОМПЛЕКСУ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ)**

**А.Б. Ситніков**

*Институт геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: geoj@bigmir.net  
Доктор геолого-мінералогічних наук, професор, завідувач лабораторії техногенної гідрогеології.*

На прикладі пещерного комплексу Києво-Печерської Лаври наведені типові методичні аспекти достовірності досліджень теплового переносу. Особлива увага звернена на точність визначень вимірювальних приладів і вихідних параметрів фундаментальних та спрощених законів стану вологи у пещерному просторі і грунтах.

*Ключові слова:* достовірність, похибка, тепломологообмін, пещерний комплекс, Києво-Печерська Лавра, параметри, математичне моделювання.

Чтобы обеспечить эффективность мероприятий с точки зрения хозяйственной и природоохранной деятельности, точнее, обосновать их тип, оптимальный режим их эксплуатации и месторасположение, необходимо достоверно оценить существующее и прогнозируемое состояние геологической среды. Под геологической средой подразумеваем в общем случае гетерогенные неоднородные пористо-трещиноватые, трехфазные, подверженные человеческой деятельности горные породы (ненасыщенно-насыщенные влагой почвогрунты), а также крупные подземные полости, в частности пещеры. Так как весьма распространены активными, подвижными и способными к транспортированию являются жидкие и газообразные вещества, к которым относятся вода (точнее, подземный водный раствор), воздух с парообразной влагой, нефть, то состояние геологической среды прежде всего зависит от их свойств, массового содержания растворенных веществ, конвективных и диффузионных скоростей массопереноса, массообмена и др. В современных природно-техногенных условиях происходит постоянное пространственно-временное благоприятное и неблагоприятное изменение этих свойств в результате многофакторного внутреннего и внешнего воздействия температуры, давления, физико-химических преобразований, а также сопутствующих процессов и явлений (например, сорбции или десорбции, конденсации и испарения).

Указанные вещества являются объектом исследований многих научных дисциплин, которыми в настоящее время накоплен значительный информационный материал. Современные достижения геологии, географии и, особенно, физики, химии, математики, биологии таковы, что позволяют охарактеризовать существующее состояние, а также прогнозировать его не только в качественном, но и количественном отношении, несмотря на сложность происходящих реальных природных процессов. А, значит, оценить истинность хотя бы крайне возможных прогнозируемых значений, обеспечив определенность результатов, т. е. оценить максимально возможную погрешность.

Отметим, что, учитывая сложность условий среды, наиболее надежным методом количественных исследований является ма-

тематическое моделирование, основанное на реализации так называемых физико-математических моделей с требуемой точностью отображающих процессы в конкретной реальной среде. Указанные модели чаще всего представляют собой в общем случае системы неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка (или интегральных), полученных на основе всеобщего уравнения сохранения баланса массы веществ (непрерывности), а также импульса движения (количества движения), в том числе иногда уравнений баланса энергий. Именно реализация указанных моделей, т. е. их устойчивое решение при известных начальных и граничных условиях I–IV родов, имитирующих осуществленные мероприятия. Точнее, обычно практически решаются их конечноразностные аппроксимации, используя явные или неявные схемы реализации. Конечно, эта вынужденная конечноразностная замена исходных дифференциальных уравнений связана с появлением особых методических погрешностей. Наш опыт математического аналогового или цифрового моделирования на компьютерах показывает, что в настоящее время удается осуществить с определенной точностью решения весьма сложных уравнений, описывающих резко нелинейные процессы влаго-солепереноса в ненасыщенно-насыщенных водою грунтах, в частности, совместного переноса влаги и керосина, а также миграции радионуклидов в типовых грунтах зоны Чернобыльской катастрофы, и тем более линейную многослойную фильтрацию подземных вод, хотя бы при допустимом упрощении исходных линейных уравнений фильтрации подземной жидкой воды. Интересно отметить, что в настоящее время только благодаря накопленному опыту поэтапного исследования (от составления моделей, систематизации результатов опытно-исследовательских экспериментов и мониторинговых наблюдений, математических вычислительных операций) можно осуществить реализацию исходной модели, обосновав заведомо крайне возможные прогнозные значения.

В мировой и отечественной практике математического моделирования не существует универсальных методов оценки истинности (достоверности) всех этих по-

этапных исследований. При этом отсутствует однозначное определение этого понятия. Нами предлагается такая критериальная оценка термина «достоверность». Достоверность – это показатель истинности, если обоснованы: физико-химическая и геологическая определенность, детерминизм (100%-ная вероятность), значение компетентного объема (времени), контролируемые погрешности исходных физико-математических моделей, опытных определений, результатов наблюдений, а также вычислительных операций, в том числе прогнозных. Такое понятие нацеливает на необходимость выполнения определенных положений. Покажем эти основные методические приемы на примере количественного изучения пещерного комплекса Киево-Печерской Лавры, ограничившись кратким изложением указанных критериев.

Итак, согласно критерию определенности пространственно-временные особенности объекта изучения обращают особое внимание на проявления возможных процессов и явлений, пределы изменения факторного воздействия, в том числе планируемых мероприятий, а также допустимой погрешности изменения состояния среды, увязанной с требуемой точностью. Обычно описание выполняется в виде тестового изложения с указанием литературных источников, отражающих современный уровень изученности. В результате осмысленный анализ имеющегося информативного материала нацеливает на возможную разработку новых теоретических и методических положений, а также дополнительных опытных экспериментов и наблюдений. Так, пещерный комплекс Киево-Печерской Лавры представляет собой сложно пространственно ориентированные пещеры, расположенные в ненасыщенно-насыщенных грунтах. Составление воздуха пещер определяется тепло-влажностным обменом с окружающим грунтом, а также эпизодической связью с атмосферным воздухом через несколько вентиляционных отверстий и входные дверные проемы.

Характерной особенностью пещерных условий обычно является [Рыбин и др., 1991]: отсутствие отрицательных и меньших 5 °С и больших 30 °С температур (за исключением аварийных случаев); сходство с атмосферным воздухом; проявление лишь

явлений испарения и конденсации; отсутствие существенного турбулентного движения воздуха (вынужденной конвекции); возможное изменение относительной влажности воздуха пещер (40 ÷ 100)%; одномерный нисходящий в вышезалегающей толще грунтов (у стенок иногда двухмерный) влагоперенос; минерализация поровой влаги не превышает 5,0 кг/м<sup>3</sup>; летом и в первой половине осени наблюдается максимум всасывающих давлений грунта -20 ÷ -45 кПа, зимой и весной они падают до < -50 ÷ -80 кПа. Кстати, основное поступление влаги осуществляется со стороны дневной поверхности за счет атмосферных осадков. Парообразная влага и теплота (наряду с внутренними источниками) в пещеры поступают также через вентиляционные отверстия и входы-выходы. Внешний воздух характеризуется, согласно данным метеостанции, типичными среднемесячными изменениями температур, упругостей водяного пара, относительных влажностей и атмосферных осадков [Рыбин и др., 1991].

Основными условно названными нами источниками водообмена в пещерном воздушном пространстве являются: влагообмен с грунтами, конвективный влагообмен за счет вертикальной вентиляционной системы, влагообмен со стороны вход-выход, испарение и дыхание человека, работа кондиционера, внутripещерное испарение или конденсация влаги. Из источников изменения температуры выделим следующие: фазовые преобразования, температурный обмен со стороны грунтов, конвективный вентиляционный принос (уход) тепла, принос (уход) теплоты со стороны входа-выхода; теплообмен за счет нагревательных приборов, кондиционера, свечей, лампадок и пр., а также со стороны человека.

Именно оценка роли указанных источников позволяет проводить достоверные мониторинговые режимные наблюдения и эксперименты за температурным и влажностным состоянием контролируемой среды, обосновав пространственно-временное расположение, режим работы, конструкцию и приборную точность применяемых датчиков, а также запланировать наиболее эффективные мероприятия и запроектировать надежные в эксплуатации инженерные сооружения.

В общем случае, количественные исследования состояния среды проводятся на основании общебалансового метода и математического моделирования как наиболее точного, но трудоемкого. По причине необходимости усреднения величины в одном единственном изучаемом объеме общебалансовые методы принципиально отличаются от классического математического моделирования, при котором определяемые величины привязаны к конкретным элементарным объемам, отвечающим дискретным пространственно-временным координатам.

Несомненно, достоверность применяемых количественных методов прежде всего зависит от используемых всеобщих уравнений сохранения массы веществ, количества движения и энергии, предусматривающих обоснованность законов состояния: пространственно-временного изменения массы веществ, массовых скоростей диффузионного (на молекулярном уровне), молярного, конвективного переноса веществ. Именно эти законы положены в основу исходных вычислительных формул и реальных уравнений влаготеплопереноса, решение которых необходимо проводить с учетом начальных и граничных условий (в том числе имитирующих запланированные мероприятия), а также внутренних источников влаготеплообмена. По сути, мы имеем дело с достаточно сложными многочисленными функциональными зависимостями, предусматривающими выполнение по заданному алгоритму разнообразных разного порядка математических операций (алгебраического сложения, умножения и деления, возведения в степень, логарифмирования), обеспечивающих однозначное решение при условии однозначности исходных параметров. Кстати, в ряде случаев исходные параметры также могут представлять собой некоторые зависимости от определенных факторов (температуры, минерализации, давления, содержания веществ), а также точности испытательных и измерительных устройств. Конечно, достижение однозначного значения не является доказательством их истинности. Правильнее утверждать, что любая однозначная величина обладает некоторой погрешностью, а ее истинное значение находится в некоторых пределах, определяющихся ее погрешностью.

Важно отметить, что под законом (механизмом) состояния прежде всего подразумевается пригодная для широкого класса задач теплопереноса однозначная детерминированная зависимость, не обладающая погрешностью. А это значит, что любой известный фундаментальный (так называемый всеобщий закон) и частный (обычно упрощенный) механизм все же хотя и пригодны для достоверных исследований, однако теоретически не учитывают каких-то мало значимых факторных воздействий. Поэтому желательно оценивать роль неучтенных ими факторов, что обычно выполняется сравнением результатов опытных работ (наблюдений и экспериментов) в лабораторных и натуральных условиях, в том числе на основе фундаментальных физико-химических констант, физического моделирования и современных достижений теории вероятности. Конечно, обязателен сравнительный анализ определений разными принципиально отличающимися методами. Наиболее убедительным является так называемый способ решения обратных задач согласно режимным натурным наблюдениям. Так, для оценки инфильтрационного питания водоносных горизонтов, наряду с общебалансовым подходом, применяются гидрофизический, геофизический, гидрохимический, лизиметрический, способ «ниш» и др. Основное преимущество искусственных лабораторных методов заключается в надежном контроле за расходами веществ и движущими силами в отличие от натуральных исследований, основанных на режимных наблюдениях за последними, однако учитывающих внутренние взаимосвязи разных факторов [Ситников, 2010].

Обратим внимание, что количественные исследования с учетом надежной оценки погрешностей их результатов, наряду с увеличением длительности этих работ, требуют высокого уровня знаний, современных измерительных устройств, совершенных приборов для изысканий, высокого класса вычислительных машин, что несомненно связано со значительными затратами, возрастающими с увеличением требуемой приборной точности. Особенно дорогостоящими являются дополнительные натурные изыскания. Кстати, по моему мнению,

согласно современным достижениям науки и техники принципиально можно получить достоверные результаты с любой требуемой точностью. Однако на повестке дня – обеспечение отвечающей требуемой точности погрешностей приближенных вычислений без дополнительных исследований. Это требует минимальных затрат, к тому же упрощаются исходные для прогнозных расчетов формулы и уравнения.

Важно отметить, что не всегда максимально возможные параметры обеспечивают худший (пессимистический) результат, а минимальные их значения – оптимистический с точки зрения хозяйственной и природоохранной деятельности. По нашему мнению, такое несколько условное название концепции нацеливает не только на крайне возможные количественные значения прогнозируемых величин, но также на их качественное значение. Так, при прогнозе содержания радионуклида в грунтах большее значение указывает на загрязненность, а в случае пещерного комплекса увеличение влажности приводит, в частности, к ослаблению устойчивости грунтов. То есть пессимистический результат соответствует максимальным значениям прогнозируемых величин. Поэтому разрабатываемая нами концепция пессимистических и оптимистических значений предусматривает переосмысление их с такой точки зрения. Логический путь наиболее эффективен по сравнению с методом перебора и другими приемами оценки чувствительности результатов решений от изменения исходных параметров. Однако этот путь субъективен и требует не только понимания сути процесса, но также внимательности и способности к четким последовательным логическим построениям. Практическую пригодность указанного пути было подтверждено при осуществлении прогнозов радиоактивного загрязнения в сложных условиях полигона «Весняное» зоны Чернобыльской катастрофы [Ситников, 2010]. Тогда было пересмотрено с точки зрения пессимистического, оптимистического и среднего значений около 34 исходных для прогноза начальных условий и основных (заведомо значимых) параметров миграции радиоактивного стронция отдельно в подземном водном растворе и для всего грунта.

Таким образом, изучение ошибок (погрешностей) – необходимое условие при обосновании достоверности требуемых количественных исследований. Их изучение является наиболее актуальной проблемой современности, над разрешением которой трудятся прежде всего математики, кибернетики. Однако, несмотря на успешные достижения, остается ряд проблемных вопросов при математическом моделировании средней сложности природных процессов тепломассопереноса. Например, нельзя предугадать необходимую устойчивость явной схемы решения, поэтому для ее обоснования требуется выполнять многочисленные специальные дополнительные вычислительные операции.

Теперь рассмотрим в несколько упрощенном виде основные положения и правила вычисления (алгоритмы), которые предлагаются нами применять согласно элементарной теории ошибок [Бронштейн, Семендяев, 1981]. Так как использованные нами величины представляются численно, то они реализуются лишь приблизительно, с некоторой ошибкой. В соответствии в общепринятыми в математике обозначениями, точное значение величины обозначается также, как и сама величина, буквами:  $x, y, z, \dots, a, b, c, d, \dots$ . Буква с чертой сверху указывает на соответствующее значение, содержащее ошибку, т. е. числа, с которыми мы фактически проводим вычисления. Следовательно,  $\delta(x) = \bar{x} - x$  обозначает истинную абсолютную ошибку,  $\underline{\delta}(x)$  – нижнюю,  $\bar{\delta}(x)$  – верхнюю границу;  $\rho(x) = \delta(x) / x$  – относительную истинную ошибку, а  $\Delta(x) = (|\underline{\delta}(x)|, |\bar{\delta}(x)|)$  – так называемую предельную максимальную абсолютную ошибку. Таким образом,  $x = \bar{x} - \delta(x)$ ,  $\underline{\delta}(x) \leq \delta(x) \leq \bar{\delta}(x)$ ,  $x - \bar{x} = \Delta(\bar{x})$ .

Для проведения численного расчета нужно знать, каковы исходные данные, с какой точностью должны быть получены конечные выходные данные, какова возможная точность выполнения операций и какой алгоритм должен быть применен в связи с этим.

Существуют три источника ошибок [Бронштейн, Семендяев, 1981]: 1) ошибка входных данных; 2) ошибка метода вычислений; 3) ошибка округления (машинная ошибка), так называемая дополнительная

ошибка. Ошибка метода (ошибка обрыва) является мерой отклонения вычислительной модели от точной и может появляться даже тогда, когда исходные данные точны. Ошибка, обусловленная входом-выходом, является оценкой распространения ошибки ввода при вычислении. Машинная ошибка является мерой случайных ошибок, присоединяющихся от машинной реализации действий. Она зависит от конструктивных особенностей вычислительной техники. Так, современные аналоговые вычислительные машины характеризуются прежде всего приборной точностью, определяющей большие вычислительные погрешности, однако обладают контролируемым устойчивым решением по неявной схеме. Современные цифровые вычислительные машины, в отличие от предыдущих, позволяют вычислять с большой точностью (около  $10^{-7}\%$ ), но весьма чувствительны к неконтролируемому накоплению случайных ошибок за счет округлений, потери значущих разрядов при вычитании, при делении на маленькие числа, близкие к нулю.

Наш опыт математического моделирования переноса веществ в природной среде показывает, что наиболее эффективной в случае применения современных числовых вычислительных машин типа персональных компьютеров является конечноразностная аппроксимация исходных модельных дифференциальных или интегральных уравнений, реализуемых по явной схеме решения. Применение указанного приближенного численного метода оказалось целесообразным даже для решения резко нелинейных задач переноса влаги и солей в ненасыщенно-насыщенных водно почвогрунтах приповерхностного слоя Земли [Ситников, 2010].

Напомним, что простейшим способом получения приближенного значения числа является отбрасывание цифр в его более точном изображении (обрыв), начиная с некоторого разряда. Кроме обрыва наиболее применяются: округление с недостатком, когда за последней сохраняемой цифрой следуют цифры 0, 1, 2, 3 или 4; а также округление с избытком, когда следуют цифры 9, 8, 7, 6 или 5 и к последней цифре прибавляется единица. Так, число  $\pi = 3,1415965\dots$

округляется до значения 3,14 или 3,142. Округление обуславливает абсолютную погрешность  $0,5 \cdot 10^{-4}$ , обрыв  $10^{-4}$ , где  $\nu$  – число знаков после запятой [Бронштейн, Семендяев, 1981].

Если  $f(x_1, \dots, x_k)$  – функция переменных  $(x_1, \dots, x_k)$  с известными предельными абсолютными погрешностями  $\Delta(x_i)$ , то предельная абсолютная погрешность  $\Delta f$  равна:  $\Delta f = \Delta f = \sum_{i=1}^k \Delta(x_i) f'_{x_i}(x_1, \dots, x_k)$ , где  $f'_{x_i}$  – частные производные по переменным  $x_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) [Бронштейн, Семендяев, 1981].

Если функция  $f(x)$  задана таблицей, то  $\Delta f$  находят посредством линейной интерполяции из таблицы. Во многих случаях сложные функции можно выразить более простыми [Бронштейн, Семендяев, 1981].

Так,  $\sin x \approx x - \frac{x^3}{6}$  (относительная ошибка не превышает 0,1% при  $-0,580 < x < 0,580$ , ошибка 1% при  $\pm 1,005$ , 10% при  $\pm 1,632$ );  $\cos x \approx 1,0$  (0,1% при  $-0,045 < x < 0,045$ ; 1% при  $\pm 1,41$ ; 10% при  $\pm 0,451$ );  $\operatorname{tg} x \approx x$  (0,1% при  $\pm 0,054$ , 1% при  $\pm 0,172$ , 10% при  $\pm 0,517$ );  $e^x \approx 1 + x$  (0,1% при  $\pm 0,045$ , 1% при  $-0,134 \div 0,148$ , 10% при  $-0,375 \div 0,502$ );  $\ln(1+x) \approx (0,1\% \text{ при } \pm 0,002, 1\% \text{ при } \pm 0,020, 10\% \text{ при } -0,176 \div 0,230)$ .

В работе [Браун, Лемей, 1983] особое внимание уделено значущим цифрам, под которыми подразумеваются все цифры записи результатов измерения, включая последнюю, подчиняющиеся таким правилам: нули между ненулевыми цифрами относятся к значущим; нули, стоящие слева от первой ненулевой цифры, не относятся к ним; в отличии числа, оканчивающегося нулями. При этом надо для ясности воспользоваться записью величин в степенной форме. Например, для числа 10300, отображенного в виде  $1,03 \cdot 10^4$ , – три значущих цифры;  $1,030 \cdot 10^4$  – четыре;  $1,0300 \cdot 10^4$  – пять значущих цифр. То есть все нули справа от десятичной запятой являются значущими. Такое представление о значущих цифрах позволяет утверждать, что при умножении или делении численный результат должен включать не больше значущих цифр, чем результат измерений с наименьшим их количеством, и его следует округлить. Результат же сложения и вычитания должен включать столько

знаков после десятичной запятой, сколько их содержится в числе с наименьшим количеством знаков после десятичной запятой.

Очень важно выполнить предварительный анализ размерностей, которые для всех членов исходных уравнений должны быть одинаковыми.

Количественную оценку и прогноз изменения состояния среды обычно выполняют на основании общеканонических методов, представляющих собой сравнительно простые функциональные зависимости, отображающие разные локальные источники изменения влаги и тепла в типичном отдельном воздушном пространстве пещер и окружающих грунтах, а также системы канонических уравнений по явной или неявной схеме решения, согласно которой итерационным путем осуществляется вычисление в характерных дискретных точках устойчивого однозначного результата с учетом заданных расчетных пространственных и временных шагов. Напомним, что предложенная концепция пессимистического и оптимистического результатов решения требует обязательного обоснования худших решений при максимально возможных параметрах, начальных и граничных условий, а также желательных средних и минимально возможных значений, обуславливающих оценку абсолютных и относительных погрешностей этих решений. Несомненно, эти погрешности согласуются с требуемой точностью, т. е. граничных условий, имитирующих воздействие действующих и запланированных мероприятий.

В работах [Ситников 2010; Ситников, 2014а] приведены законы (механизмы) переноса и обмена влагой в грунтах и воздушном пространстве пещер Киево-Печерской Лавры, которые могут проявиться и быть использованы для количественного изучения состояния среды и обоснования необходимых мероприятий. Обычно это разного вида функциональные зависимости, отражающие временное и пространственное изменение тепла и массы веществ под действием движущих сил с учетом разнообразных параметров, в свою очередь зависящих от ряда факторов и специфических свойств влаговмещающих грунтов и воздуха. Для оценки достоверности всех предлагаемых указан-

ных зависимостей потребуется обоснование около 100 исходных параметрических величин, включая так называемые начальные и граничные условия, внутренние источники тепломассоизменения, в том числе нагревательные устройства и роль человеческого фактора. Из параметров выделим: объемное содержание веществ, коэффициенты диффузии влаги в воздухе, теплопроводности, влагоперенос и самодиффузия в грунтах и мн. др., в свою очередь зависящие от нескольких переменных физико-химических свойств (вязкости, плотности, агрегатного состояния, состава и минерализации, объемного содержания веществ и др.), а также ряда влияющих факторов: температуры, давления, химического состава, относительной влажности воздуха.

Если условно систематизировать все исходные величины, то можно убедиться, что погрешности некоторых из них зависят только от точности измерительных устройств и определительных приборов. Кстати, эти погрешности принципиально могут быть уменьшены, так как главным образом зависят от их конструктивных особенностей. Так, автоматизированная система метеорологического комплекса Ближних пещер Киево-Печерской Лавры применяет для измерения объемной влажности грунтов электронный датчик-рефлектометр типа МГ-44, характеризующийся ошибкой 1% объемного содержания влаги; для измерения температуры подземной воды и грунта – датчики типа ТСМ-102 с ошибкой 0,1°C; для измерения атмосферных осадков – прибор марки Rain Collector точностью  $\pm(4 \div 5\%)$ ; для измерения температуры и влажности воздуха в пещерах – цифровой датчик типа DBT с предельными ошибками температур  $\pm 1,5^\circ\text{C}$  и влажности  $\pm 3,5\%$ .

Класс точности средств измерения устанавливается государственным стандартом пределов погрешностей (в % от верхнего предела измерений или в виде относительной погрешности в % от действительного значения величины) [Физический..., 1984]. Многие приборы обязательно нормируются по относительной погрешности, заключая класс точности в кружок. Обычно нормированная точность прибора характеризуется значением наименьшего деления.

Тарированный барометр типа БК-С имеет погрешность (значимость одного деления) 1 мм рт. ст. или 133,3 Па, т. е. максимальную относительную погрешность

$$\frac{(p_{\text{атм}})_{\text{изм}} - (p_{\text{атм}})_{\text{ист}}}{(p_{\text{атм}})_{\text{ист}}} = \frac{1}{760} = \frac{133,3}{10(325)} = 0,00132$$

(0,132%). Это значит, что  $(p_{\text{атм}})_{\text{атм}} = 1,00132 \times$

$$\times (p_{\text{атм}})_{\text{ист}}, \text{ а } (p_{\text{атм}})_{\text{ист}} = (p_{\text{атм}})_{\text{ист}} = \frac{(p_{\text{атм}})_{\text{изм}}}{1,00132}.$$

Иногда, в частности [Гороновский и др., 1987], предлагается для оценки более точного атмосферного давления газа, в частности с целью определения какой-то величины, зависящей от  $(p_{\text{атм}})_{\text{ист}}$ , учитывать табулированные поправки за счет влияния температуры для ртутных барометров, имеющих латунную или стеклянную шкалу и трубку диаметром 1 см. Так, при температуре 29°C и измеренном давлении 760 мм. рт. ст. температурная депрессия ртутного столба составила +0,3 мм рт. ст., температурная поправка латунной шкалы – 3,6 мм рт. ст. Таким образом, истинное давление будет  $760 + 0,3 - 3,6 = 756,7$  мм рт. ст., что определяет относительную точность

$$\frac{756,7 - 760}{760} = 0,0043 = 0,43\%.$$

Гигрометр психрометрический ВИТ-2 гарантирует погрешность определений температур сухого термометра максимум -0,15°C, а увлажненного  $\pm 0,2$ °C; погрешность определений относительной влажности воздуха  $\pm 0,8$ °C. При необходимости точность определений относительной влажности можно увеличить за счет учета влияния изменения истинного давления атмосферного воздуха согласно предлагаемой формуле:

$$p_{\text{п}} = (p_{\text{п}})_0 - A(T - T_1) \cdot p_{\text{атм}}/100,$$

где  $p_{\text{п}}$  – упругость (давление) парообразной влаги при температуре (T) «сухого» термометра, Па;  $(p_{\text{п}})_0$  – упругость влаги воздуха при температуре ( $T_1$ ) увлажненного термометра, Па; A – постоянная психрометра, равная 0,0007947 Па/Т°C;  $p_{\text{атм}}^*$  – атмосферное давление, Па, т. е.  $(p_{\text{атм}}^*) = p_{\text{атм}}/100$ , где  $p_{\text{атм}}$ , Па.

Цифровой ручной измеритель типа RONS определяет температуру и относительную влажность с погрешностями  $\pm 1\%$  влажности и  $\pm 0,2$ °C.

Подытоживая изложенное, отметим, что точность отмеченных измерительных устройств вполне отвечает современным требованиям достоверности измеряемых величин.

Из большинства остальных величин, которые условно назовем методическими, выделим величины фундаментального и параметрического назначения. В частности, к фундаментально-методическим относятся так называемые компетентные объемы и времена, количество элементарных молекулярного уровня частиц, определяющих детерминизм законов (механизмов) состояния среды, а также поправочные эмпирические коэффициенты

$$\beta_{\text{p}} = 0,2 \div 0,7, \beta_{\text{к}} = 0,05 \div 0,6,$$

изменения которых определяют их предельные абсолютные и относительные погрешности. В общем случае, в предыдущих работах [Ситников, 2010; Ситников, 2014а] дано обоснование компетентных элементарных объемов изучаемых сред и детерминистического характера основных законов (механизмов) обмера и тепловлагопереноса в грунтах и воздушном пространстве пещер, представляя движущие силы в виде  $\text{grad } p + p \cdot g$ , возможного диффузионного и конвективного переноса веществ, внешнего изменения жидкой влаги и температуры в гетерогенной грунтовой среде и воздухе пещер, а также поясняя физико-химическую сущность параметров указанных законов. Именно эти параметры составляют около нескольких десятков величин, погрешность которых необходимо оценить. Большинство из них зависит от нескольких неизвестных и случайных факторов, определяющих предельные значения абсолютных и относительных погрешностей. Из-за краткости настоящей статьи ограничимся анализом лишь основных параметрических величин, указав на общие методические аспекты, оценим их точности. Тем более, что для конкретных задач тепловлагопереноса не потребуется учет многих из них.

Прежде всего наиболее часто остается не выяснена физико-химическая сущность случайных погрешностей, хотя углубление знаний о современных разработках в смежных научных отраслях позволяет без особых дополнительных исследований осветить этот проблемный вопрос, например, используя разные энциклопедические словари.

Погрешности параметров за счет влияния температур, давлений, концентрации и химического состава веществ и прочих факторов можно оценить согласно известным функциональным теоретическим математическим зависимостям, табличным данным, графическим отображениям, подтвержденным теоретически и многочисленными эмпирическими данными.

Среди наиболее достоверных основных параметрических величин прежде всего надо выделить коэффициент диффузии паробразной влаги:

$$D_{\text{п}} = (D_{\text{п}})_0 \cdot \left( \frac{T^{\circ}\text{K}}{273,15} \right)^{\alpha},$$

$$\alpha = 1,5 \div 2,1, (D_{\text{п}})_0 = 0,208 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с},$$

случайная погрешность которого составляет около 5 ÷ 10% [Физический..., 1984]. Достоверность этого параметра подтверждается также теоретически на основании фундаментальных законов и физических констант, в частности:

$$D = 1/3 \cdot \bar{\ell}_{\text{своб}} \cdot \bar{g}_{\text{ср}} = (0,209 \Big|_{0^{\circ}\text{C}} \div 0,220 \Big|_{30^{\circ}\text{C}}), \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\bar{g}_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8 \cdot \text{к} \cdot \text{T}}{\pi \cdot m_{\text{мол}}}} = (566,59 \Big|_{0^{\circ}\text{C}} \div 595,91 \Big|_{30^{\circ}\text{C}}), \text{ м/с};$$

$$\bar{\ell}_{\text{своб}} = \frac{1}{4\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n_0} = 1,108 \cdot 10^{-7} \text{ м},$$

где  $\text{к}$  – постоянная Больцмана ( $1,380658 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $\pi$  – число, равное 3,142, б/р;  $m$  – масса молекул воды, равная  $2,991461 \cdot 10^{-26}$  кг;  $\bar{\ell}_{\text{своб}}$  – длина свободного пробега молекул, м;  $T$  – температура, К;  $n_0$  –  $2,686763 \cdot 10^{25}$  1/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{мол}}$  – молярный вес воды, равный  $18,015 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Согласно кинетической теории газов [Ситников, 2010; Физический..., 1984], коэффициент  $D$ , динамическая вязкость ( $\eta$ ), кинематическая вязкость ( $\nu$ ) и коэффициент

теплопроводности ( $\lambda$ ) взаимосвязаны. Так,

$$\eta = \rho \cdot D_{\text{п}}, \frac{\lambda}{\eta \cdot c_{\text{ср}}} = 1, \nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Более точная связь  $D_{\text{п}} = \frac{\lambda}{\alpha \cdot \rho \cdot c_{\text{ср}}}$ , где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{\text{ср}}$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/кг;  $\alpha$  – некоторый безразмерный коэффициент, равный 2,5 для одноатомного газа, 1,9 – для двухатомного, 1,5 ÷ 1,75 – для трехатомного. Взаимоопределяемость указанных параметров позволяет при известных плотностях ( $\rho$ ) и удельной теплоемкости ( $c_{\text{ср}}$ ) оценить их по одному наиболее достоверному, например, коэффициенту диффузии.

Для обоснования достоверности нелинейных зависимостей объемного влагосодержания от всасывающего давления предлагается проанализировать предложенную нами методику дискретной оценки, основанной на 10-интервальной оценке гранулометрического состава грунтов с учетом долевого участия разных по размеру твердых частиц [Ситников, Ситникова, 2010]. Сравнение этих расчетных формул подтвердило их эффективность результатами лабораторных определений и решением обратных задач, в частности на опытном полигоне «Феофания» (г. Киев). Судя по [Ситников, Ситникова, 2010], применение основных приложений теории вероятности позволяет оценить для состояния неполного насыщения водоем типичных песчаных грунтов максимальную относительную ошибку, равную 17% объемной влажности.

Менее надежной является обобщенная нелинейная зависимость коэффициента влагопереноса и фильтрации от всасывающего давления грунтов. Ее достоверность рекомендуется оценить по предложенным нами расчетным формулам [Ситников, 2010], в частности, пригодной для грунтов, состоящих из полиминеральных шарообразных твердых частиц разного размера:

$$K_{\text{р}}(p_{\text{вс}}) = \frac{\beta_{\text{р}}^3 \cdot \rho_{\text{р}} \cdot g \cdot W_{\text{р}}(p_{\text{вс}}) \cdot h_{\text{эф}}^2}{2\eta_{\text{р}}},$$

$$h_{\text{эф}} = h_{\text{р}} - h_{\text{алс}}, \quad h_{\text{р}} = \frac{W_{\text{р}}(p_{\text{вс}})}{s_{\text{уд}} \cdot \rho_{\text{тв}}},$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  $\rho_p$  – плотность жидкой подземной воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{ТВ}}$  – плотность твердой фазы грунта, равная около  $2,6 \text{ кг/м}^3$ ;  $\beta_p$  – некоторый поправочный коэффициент, равный  $0,3 \div 0,7$  (0,5);  $W_p(\rho_{\text{ТВ}})$  – обобщенная нелинейная зависимость объемного влагосодержания исследуемого грунта, б/р;  $\eta_p$  – динамическая вязкость подземной влаги, зависящая от температуры и минерализации,  $\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ ;  $h_{\text{эф}}$  – некоторая толщина сорбированного слоя воды, равная около  $10^{-8} \text{ м}$ ;  $S_{\text{уд}}$  – удельная поверхность твердой фазы грунта,  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

Как и в предыдущем случае, указанная формула более надежна для состояния не полно насыщенного водой грунта, что подтверждается опытными определениями [Ситников, 2010].

Если в расчетном интервале не учитывать факторное влияние на изменение параметров, то предлагается учитывать их в виде максимально возможных ошибок, используемых для необходимых прогнозных расчетов. Так, по [Винников, Проскуряков, 1988], для оценки поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) известна формула  $\sigma = (75,64 - 0,15T \text{ } ^\circ\text{C}) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ ; для удельной теплоты парообразования (конденсации) – эмпирическая формула  $r = (75 - 0,024T \text{ } ^\circ\text{C}) \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ ; для коэффициента фильтрации грунта при полном его насыщении водой ( $\rho_{\text{вс}} = 0$ ) – формула

$$(K_p)_{10^0 \text{ с}} = \frac{(K_p)_{T^{\circ}\text{C}}}{0,7 + 0,03T^{\circ}\text{C}} \text{ м/сут [Ситников, 2010];}$$

согласно закону идеального газа давление парообразной влаги воздуха

$$p_n = \frac{\rho_n \cdot RT^{\circ}\text{К}}{M} \cdot \text{Интересен рисунок [Ситников, 2010, рис. 49],}$$

отражающий изменение динамической вязкости ( $\eta$ ) водных растворов в зависимости от содержания в них солей и температуры.

## Список литературы / References

1. Браун Т., Лемей Г.Ю. Химия – в центре наук. Москва: Мир, 1983. Ч. 1. 447 с.  
Braun T., Lemey H. Yu., 1983. Chemistry – in the centre of sciences. Moscow: Mir, part 1, 447 p. (in Russian).

Особенно многочисленны таблицы [Горновский и др., 1987], в которых отражены изменения от температуры плотностей и упругой парообразной влаги воздуха, коэффициентов диффузии растворенных веществ в водных растворах (в том числе самодиффузии воды), плотностей водных растворов.

С точки зрения точности изучения тепло-влагопереноса, в частности в воздушном пространстве, очень важно оценить достоверность закона идеального газа по сравнению с реальным, так как табличные данные несколько отличаются между собой. Особенно это касается значений вблизи полного насыщения влагой воздуха. Нами на основании уравнений состояния реальных газов Вандер-Ваальса и более совершенного уравнения Редлиха-Квонга [Химический..., 1983], используя показатель сжимаемости

$$z = \frac{\rho_n \cdot RT}{p_n \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}, \text{ заведомо подтверждена при-}$$

менимость закона идеального газа, а также опытными экспериментами табличные значения ( $z$  для реальных газов составляя около 0,999). Тем самым доказано, что наиболее достоверной является принятая таблица зависимости давлений парообразной влаги [Таблицы..., 1976].

Также оказалось, что роль парообразной влаги порового раствора пространства грунтов в пределах пещерного комплекса Киево-Печерской Лавры может быть эпизодически равноценной массовому содержанию воды в жидком поровом растворе. Последнее указывает на обязательный контрольный расчет этого явления.

Пока не удалось оценить роль коэффициента конвективной теплопроводности, имеющего первостепенное значение. Для его оценки необходимы натурные режимные наблюдения и эксперименты, так как теоретически он строго не подчиняется определению для реальных сред [Винников, Проскуряков, 1988].

2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Лейпциг: Тойбнер; М.: Наука, 1981. 720 с.

Bronshtein I.N., Semendiyev K.A., 1981. Mathematical Handbook. Leipzig: Teubner; Moscow: Nauka, 720 p. (in Russian).

3. Винников С.Д., Проскуряков Б.В. Гидрофизика. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1988. 248 с.  
*Vinnikov S.D., Proskuriakov B.V.*, 1988. Hydrophysics. Leningrad: Hydrometeoizdat, 248 p. (in Russian).

4. Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Наук. думка, 1987. 829 с.

*Goronovsky I.T., Nazarenko Yu.P., Nekriach Ye.F.*, 1987. Quick Reference Handbook of Chemistry. Kiev: Naukova Dumka, 829 p. (in Russian).

5. Рыбин В.Ф., Скальский А.С., Куцыба В.А., Канарева О.С. Комплексные исследования с целью охраны ближних пещер. Киев, 1991. 53 с. (Препр. / Ин-т геол. наук АН УССР).

*Rybin V.F., Skalsky A.S., Kutsyba V.A., Kanareva O.S.*, 1991. The integrated research for the purpose of the Near Caves protection. Working paper, 53 p., Kiev: Institute of Geological Sciences of NAS of USSR (in Russian).

6. Ситников А.Б. Вопросы миграции веществ в грунтах. Киев, 2010. 625 с.

*Sitnikov A.B.*, 2010. Issues of substance migration in soils. Kiev, 640 p. (in Russian).

7. Ситников А.Б. Научные основы влаго- и теплообмена в условиях пещерного комплекса Киево-Печерской Лавры. *Геол. журн.* 2014а. № 1 (346). С. 81–91.

*Sitnikov A.B.*, 2014а. The scientific foundations of moisture and heat exchange under the conditions of cave complex of Kyiv-Pechersk Lavra. *Geologichnyy zhurnal*, № 1 (346), p. 81–91 (in Russian).

8. Ситников А.Б., Ситникова В.А. Достоверность рекомендуемой для осадочных грунтов обобщенной нелинейной зависимости объемного влагосодержания от всасывающего давления. *Геол. журн.* 2010. № 2 (331). С. 105–114.

*Sitnikov A.B., Sitnikova V.A.*, 2010. Reliability of general non-linear dependence for volumetric moisture content against suction pressure recommended for sedimentary soils. *Geologichnyy zhurnal*, № 2 (331). p. 105–114 (in Russian).

9. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина, 1976. Москва: Атомиздат, 1008 с.

*Tables of physical values. Handbook*, 1976. (Ed. academician I.K. Kikoin). Moscow: Atomizdat, 1008 p. (in Russian).

10. *Физический* энциклопедический словарь. Москва: Сов. энцикл., 1984. 944 с.

*Physical encyclopedic dictionary*, 1984. Moscow: Sovetskaya Encyclopedia, 944 p. (in Russian).

11. *Химический* энциклопедический словарь / гл. ред. Кнунянц И.Л. Москва: Сов. энцикл., 1983. 791 с..

*Chemical encyclopaedic dictionary*, 1983. (Editor-in-Chief Knunians I.L). Moscow: Sovetskaya Encyclopedia, 791 p. (in Russian).

Статья поступила  
02.02.2015