

УДК 69.034.96

РЕШЕНИЕ ОПЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ ЗАДАЧ ЗАЩИТЫ ОТ ПОДТОПЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.И. Сологаев
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия
sologaev_vi@cdo.sibadi.org

АННОТАЦИЯ

Введение. Подтопление подземными водами остаётся одной из проблем городского строительства. Оно связано с движением подземных вод под зданиями и сооружениями. Эти процессы чаще всего нестационарные. Расчёт их сложный. Данной работой начинаем цикл статей по методологии решения задач фильтрации подземных вод при защите от подтопления в городском строительстве с помощью операторного метода. Практическое применение математических операторов для решения инженерных задач начал Оливер Хевисайд. Использован операторный метод с преобразованием Лапласа. Показано, как с помощью Интернета и свободной программы *Mathita* легко сделать обратные преобразования Лапласа.

Методы и материалы. Рассмотрено решение о подтоплении городской дороги при наличии купола обводнения под асфальтовым покрытием в грунтовом основании дороги. При этом впервые для фильтрационных задач подобного типа учтено уплотнение инженерной зоны грунта под дорогой. Показано, как можно решить сложную нестационарную задачу растекания купола подтопления под городской дорогой. Технология решения приведена не только со всеми математическими подробностями операторного метода, но также снабжена новыми физическими представлениями рассматриваемой методологии. Такой оригинальный подход, на взгляд автора, поможет будущим исследователям лучше представлять физику процесса подтопления в городском строительстве. Это позволит решать задачи защиты от подтопления новым, более эффективным, способом с учётом реальных нестационарных процессов фильтрации подземных вод на застроенных и застраиваемых территориях.

Обсуждение. Дана новая постановка операторного метода для решения конкретной проблемы подтопления в городском строительстве в виде последовательности – от простого к сложному. Вначале на конкретном примере продемонстрирован способ использования Интернета и лицензионно свободной программы *Mathita*. При этом взят самый простой случай в виде аналогии электричества и фильтрации. Затем рассмотрено фильтрационное растекание купола техногенных подземных вод под городской дорогой. Получены новые решения нестационарной фильтрации подземных вод в инженерной зоне грунта, которые сопоставлены с известными в мировой практике результатами.

Заключение. Таким образом, представлена методология решения задач нестационарной фильтрации подземных вод при защите от подтопления в городском строительстве с помощью операторного метода с использованием преобразований Лапласа. Это позволяет получить удобные инженерные формулы, по которым можно рассчитать уровни подземных вод и обосновать практические решения и мероприятия по защите от подтопления в городском строительстве. Работа имеет постановочный характер. Предполагается дальнейшее развитие подобных научных идей и решений по защите от подтопления на территориях застройки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подтопление, подземные воды, операторный метод, преобразования Лапласа, теория фильтрации, городское строительство.

© В.И. Сологаев



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

SOLVING THE PROBLEMS OF THE SUBMERGENCE IN URBAN CONSTRUCTION SPHERE

V.I. Sologaev

Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia
sologaev_vi@cdo.sibadi.org

ABSTRACT

Introduction. *The submergence by underground water remains one of the problems in urban construction. It is also associated with the movement of groundwater under buildings and structures. Such processes are non-stationary and their calculation is complex. The paper begins the series of researches on the methodology for solving problems of filtering groundwater while protecting against flooding in urban construction by using an operator method. Oliver Heaviside began the practical application of mathematical operators for solving engineering problems. The operator method with Laplace transformations was used. It was shown how, with the help of the Internet and Maxima program, it is easy to make inverse Laplace transformations.*

Methods and materials. *The author considered the decision on the submergence of the city road in the presence of a dome watering under asphalt pavement in the dirt road foundation. At the same time, for filtration problems of such type, the author took into account the compaction of the engineering zone of the soil under the road. The paper showed how to solve the complex non-stationary problem of spreading the dome of the flooding under the city road. The technology of the solution is presented not only with all the mathematical details of the operator method, but also provided with new physical representations. Such an original approach, by the author's opinion, would help better understanding of the flooding process physics in urban construction. Moreover, it would allow solving problems of protection against flooding by a new, more efficient way, taking into account the real non-stationary processes of filtration of groundwater in built-up areas.*

Discussion. *As a result, the author presents anew statement of the operator method for solving the submergence specific problem in urban construction. First, a specific example demonstrates how to use the Internet and the license-free Maxima program. In this case, the simplest case is taken, in the form of the electricity and filtration analogy. Then the author considers the filtration spreading of the domed man-made groundwater beneath the city road. Therefore, the paper demonstrates new solutions for non-stationary filtration of groundwater in the engineering zone, which are also compared with the world practice results.*

Conclusions. *The author presents the methodology for solving unsteady groundwater filtration problems for the submergence protection in urban construction by using the operator method and Laplace transformations. Such decisions make it possible to obtain convenient engineering formulae, by which groundwater levels, substantiate practical solutions and measures for protection against submergence in urban construction could be found. The author intends to further development of such scientific ideas and solutions for submergence protection in the built-up areas.*

KEYWORDS: *submergence, groundwater, operator method, Laplace transformations, filtration theory, urban construction.*

© V.I. Sologaev



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Подтопление подземными водами продолжает оставаться одной из проблем городского строительства [1-4], особенно подземного строительства [5]. Требуется совершенствовать понимание механизмов движения подземных вод в пористой среде [6]. Геотехника всё больше и больше соприкасается с подземными водами [7-14]. Вода, насыщающая грунт, вызывает его размягчение. Это уменьшает несущую способность грунта в основании зданий и сооружений. Возникают осадки строительных конструкций, зданий и сооружений. Неравномерные осадки приводят к трещинам в ограждающих конструкциях зданий, автомобильные дороги разрушаются. Далее через трещины строительных конструкций подземные воды просачиваются в подвалы и подземные сооружения. Подтопление усугубляется, возникают его неблагоприятные последствия, вплоть до загрязнения подземных вод и окружающей среды [15]. Такие процессы связаны с движением подземных вод под зданиями и сооружениями. Чаще всего эти процессы нестационарные, реже стационарные. Поэтому их инженерный расчёт более сложный. Получение необходимых расчётных формул научным работником для дальнейшего использования инженерами является трудоёмкой задачей. Особенно в случае нестационарной фильтрации подземных вод в условиях городского строительства. Данной работой начинаем цикл статей по методологии решения задач фильтрации подземных вод при защите от подтопления в городском строительстве с помощью операторного метода.

Практическое применение математических операторов для решения инженерных задач

начал англичанин Оливер Хевисайд (Oliver Heaviside) в конце XIX века. Правда, он занимался электричеством, тем не менее полезно начать с его простейшего примера. Начнём с известной задачи Хевисайда, попутно продемонстрировав аналогичность фильтрации и электричества.

В 1887 году Оливер Хевисайд предложил добавить катушку индуктивности в электрическую цепь для коррекции возникавших искажений в линии связи трансатлантического телеграфа между Англией и США. Рассмотрим это как пример пуска электрической цепи с катушкой индуктивности (рисунок 1).

Справа на рисунке 1 ступенчатым графиком показано напряжение $U(t)$, В. Такой график иногда называют ступенчатой функцией Хевисайда. Там же изображена кривая постепенного нарастания (установления) во времени силы тока $I(t)$, А. Сила тока стремится к пределу U/R , А. Найдём силу тока $I(t)$, А.

Исходное дифференциальное уравнение электрического тока запишем по правилу Кирхгофа о том, что напряжение источника тока равно сумме падений напряжений на сопротивлениях электрической цепи:

$$U = R \cdot I(t) + L \cdot \frac{dI(t)}{dt}, \quad (1)$$

где все обозначения см. на рисунке 1. Переменными величинами являются сила тока $I(t)$ и время t (независимая переменная). Аналогом такого уравнения в теории фильтрации может быть нестационарное движение воды в грунте по вертикали.

В простой манере, в стиле Хевисайда, используем операторный метод, но с преобразо-

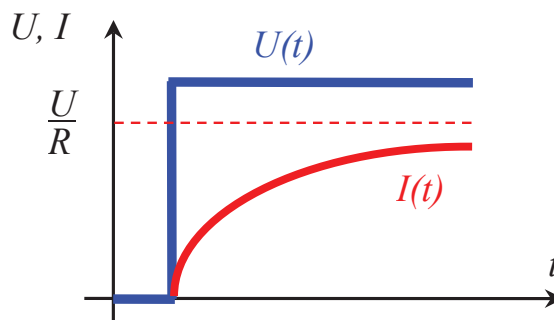
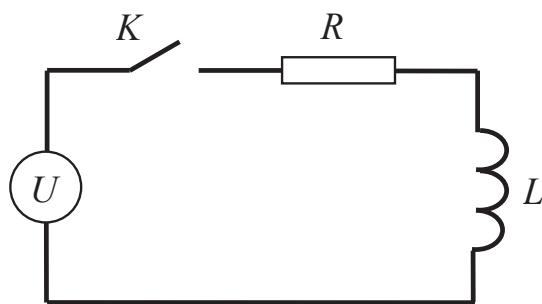


Рисунок 1 – Пуск электрической цепи с катушкой индуктивности: U – источник напряжения, В; K – ключ; R – сопротивление, Ом; L – катушка индуктивности с коэффициентом самоиндукции L , В·с/А

Figure 1 – Start of the electrical circuit with an inductor: U – voltage source, V; K – electric key; R – resistance, Ohm; L – inductor with the L self-inductance coefficient, V·s/A
Источник: составлено автором

ванием Лапласа, которое Хевисайд не применял, ограничиваясь разложением в ряд. Тем не менее, постараемся сохранить его простой инженерный стиль с физическим смыслом, без отягощения математическими доказательствами.

Оператор d/dt заменим на букву p с размерностью $1/c$. Величину p будем считать аргументом, вернее независимой переменной. Попутно отметим, что в иностранной англоязычной литературе вместо p пишут s . Это одно и то же. Зависимую переменную $I(t)$ заменяем на её изображение $J(p)$. Константу U разделим на p . В результате вместо дифференциального уравнения электрического тока в оригиналах (1) имеем уже алгебраическое уравнение в изображениях по Лапласу в виде

$$\frac{U}{p} = R \cdot J(p) + L \cdot p \cdot J(p), \quad (2)$$

откуда выразим изображение силы тока

$$J(p) = \frac{U}{p \cdot (R + L \cdot p)} = \frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p + R/L} \right), \quad (3)$$

при этом дробь разложили на простейшие с целью использования стандартного табличного обратного преобразования Лапласа.

Получив решение в изображениях, осталось сделать обратное преобразование Лапласа и получить решение в оригиналах в виде силы тока $I(t)$.

Теперь покажем, как с помощью Интернета и свободной программы Maxima легко сделать такие обратные преобразования. Заходим на доступный испанский сайт <http://maxima.cesga.es/>, набираем в жёлтой строке сайта для правой дроби в скобках в выражении (3) следующую команду обратного преобразования Лапласа на языке Maxima:

$$\text{ilt}(1/(p + R/L), p, t). \quad (4)$$

Щёлкаем мышкой по кнопке сайта *Click* и через несколько секунд видим ответ для правой дроби в скобках:

$$e^{-\frac{tR}{L}}. \quad (5)$$

Таким же путём далее, после элементарных действий и выкладок, получаем решение

в оригиналах для изменяющейся во времени силы тока в цепи (см. рисунок 1) в виде

$$I(t) = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (6)$$

Это решение, полученное операторным методом, имеет простой и понятный смысл. Сила тока в электрической цепи, имеющей реактивное и индуктивное сопротивления, при включении нарастает плавно и быстро по закону экспоненты (график см. на рисунке 1). Аналогично будет происходить нестационарное движение нисходящего потока подземных вод по вертикали. При этом надо перейти от параметров электрических к гидрогеологическим. Для чего можно воспользоваться нашей монографией [16].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

После такого простого введения в использование операторного метода можно перейти к более сложным задачам теории фильтрации применительно к городскому строительству. Рассмотрим фильтрационное растекание купола подтопления под городской дорогой. Вначале надо произвести постановочную часть задачи. При этом уровень подземных вод сокращённо обозначим как УПВ.

На рисунке 2 показано первоначальное положение купола техногенных подземных вод под городской дорогой. В первом приближении аппроксимируем его форму как прямоугольную в вертикальном разрезе. Начинать рассмотрение таких задач следует именно с простейших геометрических форм. Это даст возможность получать наиболее простые и понятные решения. В дальнейшем исходные данные можно усложнить и исследовать применительно к конкретному случаю проведения научных исследований. Задачу рассматриваем симметричную. Водоупор, на котором залегают подземные воды, считаем совпадающим с горизонтальной плоскостью. Первоначальную мощность подземных вод в естественном состоянии без влияния инженерного сооружения принимаем H_e . Максимальная мощность (высота) купола H_k . Напоры подземных вод рассматриваем в двух зонах: под дорогой – H_1 , за пределами дороги – H_2 . Максимальная разность напоров DH_n наблюдается в момент времени $t = 0$ сут.

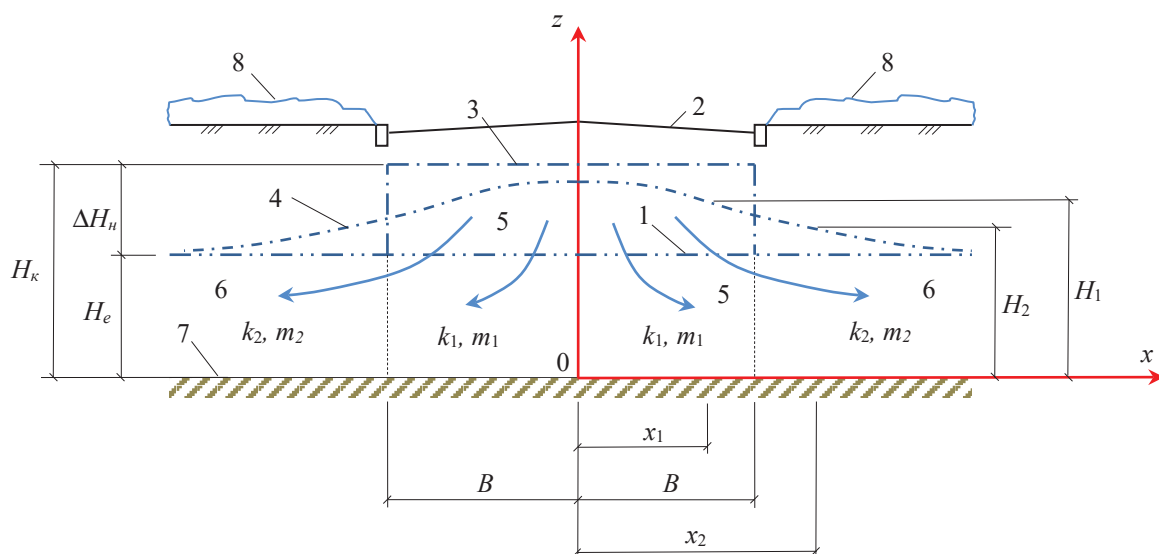


Рисунок 2 – Растекание купола подтопления под городской дорогой:
1 – начальное положение естественного УПВ; 2 – поверхность дороги;
3 – начальное положение купола УПВ;
4 – промежуточное положение УПВ с течением времени (купол подтопления);
5 – уплотнённая зона грунта и материалов под дорогой; 6 – грунт в естественном состоянии;
7 – водоупор; 8 – снег

Figure 2 – Spreading of the submergence dome under the city road: 1 – initial provision of UPV natural;
2 – road surface; 3 – initial provision of the UPV dome; 4 – intermediate position of UPV eventually (submergence dome);
5 – condensed zone of soil and materials under the road; 6 – soil in natural state;
7 – water emphasis; 8 – snow

Процесс растекания купола подземных вод под инженерным сооружением является нестационарным (см. рисунок 2). Стрелками показаны линии тока опускающегося уровня подземных вод. Первоначальное положение купола, близкое к прямоугольной форме, может сформироваться при переходе от холодного периода года к тёплому, то есть весной. В предыдущий зимний период городские дороги регулярно очищают от снега, поэтому в сравнении с прилегающей территорией поверхность дороги интенсивно отдаёт тепло из грунтового основания в атмосферу. Под влиянием температурного градиента пары влаги в грунте с поверхности УПВ начинают перемещаться вверх к холодной поверхности асфальтового покрытия. Встречаясь с отрицательными температурами, водяные пары начинают выпадать в порах грунта в виде конденсата, который тут же замерзает, образуя внутренний лёд. Так образуется морозное пучение грунта. Подробности данного процесса приведены, например в трудах учёных МГУ [17], а также в монографии Р.Ш. Абжалимова [18].

При наступлении весны грунт, содержащий столб замёрзшей влаги под дорогой, начина-

ет оттаивать сверху. Поэтому такое состояние можно представить как первоначальное положение купола подземных вод в виде прямоугольного сечения 3, показанного на рисунке 2. Именно с этого положения нужно считать начало растекания купола под дорогой, принимая момент времени растекания $t = 0$ сут при максимальной высоте купола H_k и максимальной разности напоров DH_n .

Автомобильные дороги и их грунтовые основания подвергаются интенсивному уплотнению со стороны статических и динамических нагрузок как в процессе строительства, так и в процессе эксплуатации. Поэтому под дорогами фильтрационные характеристики грунта изменяются в сторону уменьшения проницаемости, водоотдачи и недостатка насыщения. Такую зону грунтового основания обозначим шириной $2B$ (см. рисунок 2). В ходе изыскательских работ фильтрационные характеристики и размеры этой зоны пониженной проницаемости на существующих дорогах могут быть уточнены бурением.

Фильтрационные характеристики грунтового основания под дорогой шириной $2B$ в течение длительного периода эксплуатации доро-

ги изменятся. Коэффициент фильтрации k_1 в этой зоне под влиянием уплотнения станет меньше, чем коэффициент фильтрации k_2 за пределами этой зоны, то есть в ненарушенном грунте. Коэффициенты водоотдачи (недостатка насыщения) для соответствующих грунтовых зон m_1 и m_2 тоже должны измениться. Все эти особенности показаны на рисунке 2.

Другим важным моментом в процессе постановки задачи является определение возможного способа линеаризации исходных дифференциальных уравнений фильтрации, которые изначально являются нелинейными. Подземные воды в основании зданий и сооружений чаще всего встречаются как грунтовые воды. Это означает, что водоносный горизонт имеет свободную поверхность, давление на которой равно атмосферному. Кроме того, над этой свободной поверхностью имеется зона капиллярного подъёма. Пока её наличие учитывать не будем, отложив для более сложных случаев расчёта.

Используя принцип сохранения баланса фильтрующейся под дорогой влаги и закон Дарси, составим систему из двух дифференциальных уравнений. При этом выбор способа линеаризации произведём по рекомендациям Н.П. Куранова [19, 20]. Данная задача относится к прогнозам подтопления. Поэтому выбираем 1-й способ линеаризации, который в иностранной литературе называют способом линеаризации по Буссинеску. Тогда систему из двух дифференциальных уравнений нестационарной безнапорной фильтрации подземных вод можно записать в таком виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} &= \frac{1}{c \cdot a} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial t}; & |x| \leq B; & \quad c = k_0/m_0; \quad m_0 = m_1/m_2; \\ \frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} &= \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial H_2}{\partial t}; & |x| \geq B; & \quad a = k_2 \cdot H_e/m_2; \quad k_0 = k_1/k_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Для постановки решения системы уравнений в частных производных необходимо также записать краевые условия в следующем виде:

$$\begin{aligned} H_1(x, 0) &= H_\kappa = H_e + \Delta H_n; & H_2(x, 0) &= H_e; & \partial H_1(0, t)/\partial x &= 0; \\ k_0 \frac{\partial H_1(B, t)}{\partial x} &= \frac{\partial H_2(B, t)}{\partial x}; & H_1(B, t) &= H_2(B, t); & H_2(\infty, t) &= H_e. \end{aligned} \quad (8)$$

Условия (8) требуют дополнительного пояснения, которое сделаем в порядке их следования. Первое условие является начальным условием для внутренней зоны под дорогой при $x = x_1$ на момент времени растекания $t = 0$ сут при максимальной высоте купола H_κ и максимальной разности напоров ΔH_n . Второе условие – это то же начальное условие, но уже для наружной зоны за пределами дороги при $x = x_2$, тут всюду принимаем естественный напор подземных вод $H = H_e$. Третье условие означает, что градиент напора подземных вод в центральной точке купола при $x = 0$ в любой момент времени t равен нулю, то есть движение купола в его центре (апогее) является лишь вертикальным в виде опускания УПВ вниз. Четвёртое условие отражает равенство скоростей фильтрации по закону Дарси на контакте двух зон x_1 и x_2 в течение всего периода прогнозирования при любых t , что является аналогом уравнения неразрывности. Пятое условие выражает равенство напоров подземных вод на границе двух упомянутых зон. Наконец, шестое условие «на бесконечности» является реальным фактом, что на значительном удалении от объекта исследования влияние инженерного сооружения на природные подземные воды сходит на нет.

Постановка задачи закончена. Теперь покажем, как решить операторным методом систему уравнений (7) при краевых условиях (8). Для этого вначале к оригиналам, то есть к системе (7) и условиям (8), надо применить преобразование Лапласа по времени, что позволит превратить нестационарные уравнения в псевдостационарные в виде изображений, которые будет проще решать, так как будет условно исключена зависимость от времени. Затем полученные решения в изображениях надо вернуть к оригиналам с помощью обратного преобразования Лапласа. Тогда нестационарная задача растекания купола подземных вод под дорогой будет окончательно решена. Таков план решения. Начнём.

Преобразование Лапласа по времени в применении к напору как функции горизонтальной координаты x и времени опускания купола подтопления t имеет следующий вид [21-27]:

$$h(x, p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot H(x, t) \cdot dt. \quad (9)$$

Для начинающего исследователя применение данного преобразования требует дополнительных пояснений. Интеграл (9) мысленно надо представлять как большую сумму произведений напоров на экспоненту с отрицательной степенью. Интегрирование по времени в (9) представляет собой в результате некоторую конечную величину h (не напор, а изображение напора с размерностью в метрах водяного столба, умноженного на единицу времени). В целом интеграл будет всегда сходящимся, так как при увеличении времени t (переменная) величина параметра p всегда остаётся константой, а подынтегральная экспонента, в свою очередь, быстро стремится к нулю. Поэтому большая сумма (то есть интеграл) стремится к конечному значению. Значит преобразование (9) приводит к переходу от оригинала H к изображению h , уже не зависящему от времени t . Производя таким образом преобразования дифференциальных уравнений (7) и краевых условий (8), можно получить фильтрационную задачу уже чисто стационарную, то есть не зависящую от времени. А решение таких задач уже хорошо известно. Например, можно воспользоваться справочником Камке [28], что мы и сделаем. Покажем ход решения.

Преобразование Лапласа (9), применённое к уравнениям (7), позволяет получить такую систему обыкновенных дифференциальных уравнений в изображениях:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 h_1}{dx^2} &= \frac{1}{c \cdot a} \cdot (p \cdot h_1 - H_\kappa); & |x| \leq B; \\ \frac{d^2 h_2}{dx^2} &= \frac{1}{a} \cdot (p \cdot h_2 - H_e); & |x| \geq B; \end{aligned} \quad (10)$$

причём, дополнительно (в качестве примера), поясним как получено первое из уравнений системы (10). Для этого умножим соответствующее первое уравнение (7) на экспоненту в отрицательной степени pt и проинтегрируем обе части уравнения по формуле (9) в пределах от нуля до бесконечности. Раскрывая значение интеграла в его пределах, получаем (10).

С краевыми условиями в оригиналах (8) проделываем такие же действия. Тогда получим краевые условия для области в изображениях в виде

$$\begin{aligned} dh_1(0, p)/dx &= 0; & k_0 \frac{dh_1(B, p)}{dx} &= \frac{dh_2(B, p)}{dx}; \\ h_1(B, p) &= h_2(B, p); & dh_2(\infty, t) &= H_e, \end{aligned} \quad (11)$$

при этом обращаем внимание, что в отличие от (8) в системе (11) исчезли начальные условия, то есть краевые условия (8) превратились в формулах (11) в граничные условия без учёта времени, что и требовалось получить на данном промежуточном этапе решения.

Чтобы решить систему обыкновенных дифференциальных уравнений (10), можно в целях экономии сил обратиться к справочнику Камке [28]. Находим по данной книге стандартное решение в виде

$$\begin{aligned} h_1 &= H_\kappa / p + C_1 \cdot e^{x \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} + C_2 \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}}; \\ h_2 &= H_e / p + C_3 \cdot e^{x \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} + C_4 \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}}, \end{aligned} \quad (12)$$

при этом C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные константы интегрирования, которые определим из граничных условий (11).

Процесс нахождения C_1, C_2, C_3, C_4 элементарен, его здесь не будем расписывать. Подставив найденные C_1, C_2, C_3, C_4 в (12), имеем в изображениях такую систему:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= H_\kappa / p + \frac{\Delta H_n \cdot \operatorname{ch}\left(x \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}\right)}{p \cdot \left[\operatorname{ch}\left(B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}\right) + m_0 \cdot \sqrt{c} \cdot \operatorname{sh}\left(B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}\right) \right]}; \\
 h_2 &= H_e / p + \frac{\Delta H_n \cdot m_0 \cdot \sqrt{c} \cdot e^{(B-x) \cdot \sqrt{\frac{p}{a}}} \cdot \operatorname{sh}\left(B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}\right)}{p \cdot \left[\operatorname{ch}\left(B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}\right) + m_0 \cdot \sqrt{f} \cdot \operatorname{sh}\left(B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}\right) \right]}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

От системы в изображениях (13) необходимо перейти к оригиналам, то есть к напорам подземных вод под дорогой и вне её, зависящих от времени. Задача не простая, требует нескольких шагов. Покажем, как это делать.

Вначале обратим внимание на гиперболические синус и косинус в (13). Крайне желательно эти функции выразить через экспоненты, ибо тогда обратное преобразование Лапласа легче находить. Такие действия достаточно громоздки, но не очень сложные. Оставляем читателю в качестве полезной тренировки выполнить их самостоятельно, пользуясь хорошим математическим справочником для научных работников типа такого, как [26]. В результате получим систему уравнений в виде

$$\begin{aligned}
 h_1 &= H_\kappa / p + \frac{\Delta H_n \cdot \left(e^{-\frac{(B-x) \cdot \sqrt{p}}{a}} + e^{-\frac{(B+x) \cdot \sqrt{p}}{a}} \right)}{p \cdot (m_0 \cdot \sqrt{c} + 1) \cdot \left(1 - s \cdot e^{-2B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} \right)}; \\
 h_2 &= H_e / p + \frac{\Delta H_n \cdot \left(e^{-\frac{(B-x) \cdot \sqrt{p}}{a}} + e^{-\frac{(B+x) \cdot \sqrt{p}}{a}} \right)}{p \cdot (m_0 \cdot \sqrt{c} + 1) \cdot \left(1 - s \cdot e^{-2B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} \right)}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

При этом с целью устранения громоздкости введено дополнительное обозначение

$$s = \frac{m_0 \cdot \sqrt{c} - 1}{m_0 \cdot \sqrt{c} + 1}. \tag{15}$$

Следующим шагом является разложение (14) в ряд по степеням:

$$\left[s \cdot e^{-2B \cdot \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} \right]^n. \tag{16}$$

Тогда получим

$$h_1 = H_\kappa / p + \frac{\Delta H_n}{p \cdot (m_0 \cdot \sqrt{c} + 1)} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot e^{-[(2n+1) \cdot B - x] \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} + \sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot e^{-[(2n+1) \cdot B + x] \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} \right]; \quad (17)$$

$$h_2 = H_e / p + \frac{\Delta H_n}{p \cdot (m_0 \cdot \sqrt{c} + 1)} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot e^{-[(x-B) \cdot \sqrt{c} + 2 \cdot n \cdot B] \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} - \sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot e^{-[(x-B) \cdot \sqrt{c} + 2 \cdot B \cdot (n+1)] \sqrt{\frac{p}{c \cdot a}}} \right].$$

В системе (17) члены бесконечных рядов имеют оригиналы обратного преобразования Лапласа, которые можно найти, например в книгах [21, 22]. Поэтому окончательно получим искомое решение в общем виде для определения напоров (УПВ) под дорогой и за её пределами, зависящее от времени растекания купола грунтовых вод в виде такой системы:

$$H_1 = H_\kappa - \frac{\Delta H_n}{m_0 \cdot \sqrt{c} + 1} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1) \cdot B - x}{2\sqrt{c \cdot a \cdot t}} \right) + \sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1) \cdot B + x}{2\sqrt{c \cdot a \cdot t}} \right) \right]; \quad (18)$$

$$H_2 = H_e + \frac{\Delta H_n \cdot m_0 \cdot \sqrt{c}}{m_0 \cdot \sqrt{c} + 1} \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(x-B) \cdot \sqrt{c} + 2nB}{2\sqrt{c \cdot a \cdot t}} \right) + \sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(x-B) \cdot \sqrt{c} + 2B(n+1)}{2\sqrt{c \cdot a \cdot t}} \right) \right],$$

причём все обозначения для расчёта по данным формулам показаны на рисунке 2 и в пояснениях к уравнениям (7) и (15). Функция erfc – это дополнительный интеграл вероятности. В русской версии электронных таблиц MS Excel она обозначена как ДФОШ (дополнительная функция ошибок).

Легко заметить по внешнему виду формул (18), что в зоне под дорогой происходит нестационарное опускание свободной поверхности грунтовых вод, а во внешней зоне за пределами дороги, наоборот, будет подъём, то есть подтопление с повышением УПВ. Такое утверждение основано на правой части решения в виде поправки H_1 со знаком минус (опускание) и поправки H_2 со знаком плюс (подтопление).

На основе полученного решения (18) можно записать формулу для вычисления нестационарного опускания центра купола подземных вод при $x=0$ в виде такого частного случая для середины дороги:

$$H_1 = H_\kappa - \frac{2\Delta H_n}{m_0 \cdot \sqrt{c} + 1} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} s^n \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1) \cdot B}{2\sqrt{c \cdot a \cdot t}} \right). \quad (19)$$

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравним полученные новые решения (18) и (19) с известными в мировой практике результатами. Академик П.Я. Полубаринова-Кочина [29, 30, 31] получила нестационарное решение для напоров подземных вод в однородном пласте в общем виде

$$H = H_e + \frac{\Delta H_n}{2} \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{B-x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{B+x}{2\sqrt{a \cdot t}} \right) \right]; \quad 0 < |x| < \infty, \quad (20)$$

а для центра купола при $x=0$ в виде

$$H = H_e + \Delta H_n \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{B}{2\sqrt{a \cdot t}} \right); \quad 0 < |x| < \infty, \quad (21)$$

Наши формулы (18) и (19) при $m_0=1$ и $k_0=1$ переходят в формулы П.Я. Полубариновой-Кочиной, соответственно, (20) и (21). Следовательно, наши решения (18) и (19) верны и могут быть рекомендованы к использованию при расчёте защиты от подтопления в городском строительстве.

Выясним, являются ли полученные нами формулы (18) и (19) надёжными и удобными для инженеров, работающих в сфере городского строительства, сталкивающихся с проблемой подтопления. Материалы статьи могут быть использованы работниками дорожного хозяйства и благоустройства, а также специалистами по эксплуатации и обслуживанию объектов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ).

Городские дороги в основном являются типичными линейными объектами. Поэтому начало изложения основной части статьи было представлено решением проблемы нестационарного растекания купола подтопления под городской дорогой (см. рисунок 2). Для зданий и сооружений как объектов ЖКХ случай рассмотрения линейной нестационарной задачи подтопления под ними надо начинать с критерия соотношения сторон строительного объекта, то есть отношения длины к ширине. Если это отношение больше 5, то с точки зрения теории фильтрации, которая лежит в основе методологии защиты от подтопления, такой строительный объект является линейным [32]. Поэтому можно применять наши формулы (18) и (19). Сказанное определяет область применения методологии, представленной в данной работе.

Продемонстрируем на конкретном примере надёжность и удобство полученных зависимостей (18) и (19). Ещё в 1980-х годах прошлого века подобные формулы считались бы громоздкими, то есть не очень удобными для инженеров. Особенно может смутить бесконечная сумма, применённая в (18) и (19). Однако в настоящее время (2019 год) можно использовать для расчёта любую доступную компьютерную программу. Например, электронные таблицы MS Excel. Члены суммы быстро убывают и можно ограничиться 10 членами.

Наш пример рассмотрим с исходными данными для наиболее важного случая по формуле (19), соответствующего центру купола подтопления (см. рисунок 2). Имеем линейный объект городского строительства (дорога, здание или сооружение). В его основании образовался купол подтопления. Под дорогой причиной этого может быть весеннее оттаивание сезонной мерзлоты. Под зданием причиной подтопления может быть внезапная утечка воды в подвале из водопровода, канализации или теплосети. Требуется рассчитать, на какую величину опустится центр купола подземных вод спустя $t = 3$ сут после возникновения подтопления под дорогой, половина ширины которой $B = 6$ м (см. рисунок 2).

Гидрогеологические параметры под объектом и на прилегающей территории определены с помощью бурения для суглинков, подстилаемых водоупорными глинами (см. рисунок 2). Коэффициенты фильтрации: $k_1 = 0,05$ м/сут, $k_2 = 0,5$ м/сут, $k_0 = 10$; коэффициенты водоотдачи: $m_1 = m_2 = 0,05$, $m_0 = 1$. Напоры: $H_e = 5$ м, $H_k = 8$ м, разность напоров $DH_H = 3$ м. Коэффициент урвннепроводности $a = k_2 \cdot H_e / m_2 = 0,05 \cdot 5 / 0,05 = 5$ м²/сут. Параметр $c = k_0 / m_0 = 10 / 1 = 10$. Дополнительный параметр по формуле (15) будет

$$s = \frac{m_0 \cdot \sqrt{c} - 1}{m_0 \cdot \sqrt{c} + 1} = \frac{1 \cdot \sqrt{10} - 1}{1 \cdot \sqrt{10} + 1} = 0,52.$$

Рассчитаем положение центра купола подтопления по нашей формуле (18) для планово-однородного водоносного пласта. Затем сравним с расчётом по формуле для планово-однородного пласта (21) по П.Я. Полубариновой-Кочиной. Для упрощения расчёта используем электронные таблицы MS Excel. При этом помним, что в русской версии Excel функция дополнительного интеграла вероятности $\operatorname{erfc}()$ обозначена как ДФОШ(), а функция $\operatorname{erf}()$ обозначена как ФОШ(). Результаты сравнительных расчётов такие.

По нашей формуле (18) через 3 суток напор подземных вод в центре купола

$$H_1 = 8 - \frac{2 \cdot 3}{1 \cdot \sqrt{10} + 1} \cdot \sum_{n=0}^{10} 0,52^n \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{(2n+1) \cdot 6}{2\sqrt{10} \cdot 5 \cdot 3}\right) = 7,61 \text{ м},$$

то есть уровень подземных вод (УПВ) опустился на $8 - 7,61 = 0,39$ м.

По формуле П.Я. Полубариновой-Кочиной (21) напор подземных вод в центре купола

$$H = 5 + 3 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{6}{2\sqrt{5 \cdot 3}}\right) = 7,18 \text{ м},$$

то есть уровень подземных вод (УПВ) рассчитан с опусканием $8 - 7,18 = 0,82$ м, что примерно в 2 раза завышает реальное опускание купола подтопления в плано-неоднородном пласте. Поэтому по нашей формуле (18) прогноз подтопления более надёжный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в представленной работе последовательно, от простого к сложному, продемонстрировано решение задач нестационарной фильтрации подземных вод при защите от подтопления в городском строительстве с помощью операторного метода с использованием преобразований Лапласа. Это позволяет получить надёжные формулы, по которым можно рассчитать уровень подземных вод. Представленная методология даёт возможность довести получаемые зависимости до инженерного вида. Это позволит научно обосновать практические решения и мероприятия по защите от подтопления в городском строительстве. Работа имеет постановочный характер нового направления. Предполагается продолжение развития идей и методов теории фильтрации в городском строительстве с помощью операторного метода, позволяющего решать нестационарные задачи, которые наиболее достоверно описывают реальные процессы в природе и техногенной среде на застраиваемых и застроенных территориях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Huggenberger P., Jannis E. *Urban Geology. Process-Oriented Concepts for Adaptive and Integrated Resource Management*. Springer, Basel, 2011, 233 p. DOI 10.1007/978-3-0348-0185-0.
2. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. *Mathematical Model of Dangerous Changing the Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities*. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. Vol. 1, No. 2, 2015, pp. 86–90.
3. Kremez V. S., Buts Y. V., Tsybmal V. A., 2003. *Actual issues of modeling flooding territories*

and other dangerous processes concerned with groundwater regime changes. *Environmental Ecology and Life Safety*. No. 6, 2003, pp.56–64.

4. Telima S.V., Revyakina N.Y. *Model research processes of flooding by groundwater of urban areas in modern conditions*. *Environmental Safety and Nature Resources*. No. 7, 2011, pp. 45–63.

5. Gattinoni P., Pizzarotti E., Scesi L. *Engineering Geology for Underground Works*. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2014. 312 p. DOI 10.1007/978-94-007-7850-4.

6. Haque Muhammad I. *Mechanics of Groundwater in Porous Media*. CRC Press, 2017. 280 p. <https://www.crcpress.com/Mechanics-of-Groundwater-in-Porous-Media/Haque/p/book/9781138072220>

7. Briaud J.L. *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*. Wiley, 2013. 1024 p.

8. Cushman John H., Tartakovsky Daniel M. *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press, 2016. 1074 p.

9. Nonner J.C. *Introduction to Hydrogeology*. CRC Press, 2015. 266 p.

10. Eslamian Saeid, Eslamian Faezeh A. *Handbook of Drought and Water Scarcity*. CRC Press, 2017. 2145 p.

11. Walton C. *Principles of Groundwater Engineering*. CRC Press, 1990. 568 p.

12. Gray Nicholas. *Water Science and Technology: An Introduction*. CRC Press, 2017. 680 p.

13. Villholth Karen G. et al. *Advances in Groundwater Governance*. CRC Press, 2017. 594 p.

14. Ebrahim G. Y. *Modelling Groundwater Systems: Understanding and Improving Groundwater Quantity and Quality Management*. CRC Press, 2014. 196 p.

15. Kringel R. et al. *Mass balance of nitrogen and potassium in urban groundwater in Central Africa* *Science of the Total Environment*, 547 (2016), pp. 382–395. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.090> . Published by Elsevier B.V.

16. Сологаев В.И. *Фильтрационные расчёты и компьютерное моделирование при защите от подтопления в городском строительстве* : Монография. Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. 416 с.

17. *Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях* / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, В.Г. Меламед. М.: Изд-во МГУ, 1974. 432 с.

18. Абжалимов Р.Ш. Использование сезонно промерзающих пучинистых грунтов в качестве оснований для фундаментов малоэтажных зданий и подземных сооружений в инженерной практике: Монография. Омск: Омскбланкиздат, 2013. 442 с.

19. Куранов Н.П. Линейные модели гидродинамической теории фильтрации // Доклады Академии наук СССР. М.: Наука, 1984. Том 278, № 2. С. 309–313.

20. Куранов Н.П. О связи гидродинамической и гидравлической теорий фильтрации и способах их линеаризации при исследовании вопросов подтопления территорий грунтовыми водами // Инженерная защита территорий. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. С. 5–20.

21. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. М.: Наука, 1974. 544 с.

22. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М.: Высшая школа, 1965. 467 с.

23. Карслоу Х., Егер Д. Операционные методы в прикладной математике. М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948. 292 с.

24. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.

25. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 1985. 480 с.

26. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.

27. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.

28. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1976. 576 с.

29. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Гостехтеориздат, 1952. 676 с.

30. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.

31. Полубаринова-Кочина П.Я., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н. Математические методы в вопросах орошения. М.: Наука, 1969. 416 с.

32. Прогнозы подтопления и расчёт дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях / ВНИИ ВОДГЕО. М.: Стройиздат, 1991. 272 с. (Справочное пособие к СНиП). Авт.: А.Ж. Муфтахов, И.В. Коринченко, Н.М. Григорьева, А.П. Шевчик, В.И. Сологаев.

REFERENCES

1. Huggenberger P., Jannis E. Urban Geology. Process-Oriented Concepts for Adaptive and Integrated Resource Management. Springer, Basel, 2011, 233 p. DOI 10.1007/978-3-0348-0185-0.

2. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical Model of Dangerous Changing the Groundwater Level in Ukrainian Industrial Cities. Journal of Environment Protection and Sustainable Development. Vol. 1, No. 2, 2015, pp. 86–90.

3. Kremez V. S., Buts Y. V., Tsymbal V. A., 2003. Actual issues of modeling flooding territories and other dangerous processes concerned with groundwater regime changes. Environmental Ecology and Life Safety. No. 6, 2003, pp.56–64.

4. Telima S.V., Revyakina N.Y. Model research processes of flooding by groundwater of urban areas in modern conditions. Environmental Safety and Nature Resources. No. 7, 2011, pp. 45–63.

5. Gattinoni P., Pizzarotti E., Scesi L. Engineering Geology for Underground Works. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2014. 312 p. DOI 10.1007/978-94-007-7850-4.

6. Haque Muhammad I. Mechanics of Groundwater in Porous Media. CRC Press, 2017. 280 p. <https://www.crcpress.com/Mechanics-of-Groundwater-in-Porous-Media/Haque/p/book/9781138072220>

7. Briaud J.L. Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. Wiley, 2013. 1024 p.

8. Cushman John H., Tartakovsky Daniel M. The Handbook of Groundwater Engineering. CRC Press, 2016. 1074 p.

9. Nonner J.C. Introduction to Hydrogeology. CRC Press, 2015. 266 p.

10. Eslamian Saeid, Eslamian Faezeh A. Handbook of Drought and Water Scarcity. CRC Press, 2017. 2145 p.

11. Walton C. Principles of Groundwater Engineering. CRC Press, 1990. 568 p.

12. Gray Nicholas. Water Science and Technology: An Introduction. CRC Press, 2017. 680 p.

13. Villholth Karen G. et al. Advances in Groundwater Governance. CRC Press, 2017. 594 p.

14. Ebrahim G. Y. Modelling Groundwater Systems: Understanding and Improving

Groundwater Quantity and Quality Management. CRC Press, 2014. 196 p.

15. Kringel R. et al. Mass balance of nitrogen and potassium in urban groundwater in Central Africa Science of the Total Environment, 547 (2016), pp. 382–395. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.090> . Published by Elsevier B.V.

16. Sologaev V.I. *Fil'tratsionnye raschety i komp'yuternoe modelirovanie pri zashchite ot podtopleniya v gorodskom stroitel'stve*: Monografiya [Filtrational calculations and computer modeling at flooding protection in city construction]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2002. 416 p. (in Russian)

17. *Osnovy merzlotnogo prognoza pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyakh* [Bases of the cryosolic forecast at engineering-geological researches]. V.A. Kudryavtsev, L.S. Garagulya, K.A. Kondrat'eva, V.G. Melamed. M.: Izd-vo MGU, 1974. 432 p. (in Russian)

18. Abzhalimov R.Sh. *Ispol'zovanie sezonno promerzayushchikh puchinistyx gruntov v kachestve osnovanii dlya fundamentov maloetazhnykh zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v inzhenernoi praktike*: Monografiya [Use of the soil which is seasonally freezing through the puchinistyx as the bases for the bases of low buildings and underground constructions in engineering practice]. Omsk: Omskblankizdat, 2013. 442 p. (in Russian)

19. Kuranov N.P. Lineinye modeli gidrodinamicheskoi teorii fil'tratsii [Linear models of the hydrodynamic theory of filtering]. *Doklady Akademii nauk SSSR*. Moscow, Nauka, 1984. Tom 278, no 2. pp. 309–313. (in Russian).

20. Kuranov N.P. O svyazi gidrodinamicheskoi i gidravlicheskoj teorii fil'tratsii i sposobakh ikh linearizatsii pri issledovanii voprosov podtopleniya territorii gruntovymi vodami [About communication of hydrodynamic and hydraulic theories of filtering and ways of their linearization at a research of issues of flooding of territories by subsoil waters]. *Inzhenernaya zashchita territorii*, Moscow, VNII VODGEO, 1982. pp. 5–20. (in Russian).

21. Ditkin V.A., Prudnikov A.P. *Integral'nye preobrazovaniya i operatsionnoe ischislenie* [Integrated conversions and operational calculation]. Moscow, Nauka, 1974. 544 p. (in Russian).

22. Ditkin V.A., Prudnikov A.P. *Spravochnik po operatsionnomu ischisleniyu* [Reference book on operational calculation]. Moscow, Vysshaya shkola, 1965. 467 p. (in Russian).

23. Karslou Kh., Eger D. *Operatsionnye metody v prikladnoi matematike* [Operational

methods in applied mathematics]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo inostrannoj literatury, 1948. 292 p. (in Russian).

24. Karslou G., Eger D. *Teploprovodnost' tverdykh tel* [Teploprovodnost' of solid bodies]. Moscow, Nauka, 1964. 487 p. (in Russian).

25. Kartashov E.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in the theory of heat conductivity of solid bodies]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985. 480 p. (in Russian).

26. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [The reference book on mathematics for scientists and engineers]. Moscow Nauka, 1984. 832 p. (in Russian).

27. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. *Teoriya teplo- i massoperenosa* [Theory warm and mass transfer]. M.-L.: Gosenergoizdat, 1963. 536 p. (in Russian).

28. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam* [Reference book on ordinary differential equations]. Moscow, Nauka, 1976. 576 p. (in Russian)

29. Polubarinova-Kochina P.Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [Theory of the subsoil waters movement]. Moscow, Gostekhteorizdat, 1952. 676 p. (in Russian).

30. Polubarinova-Kochina P.Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [Theory of the subsoil waters movement]. Moscow, Nauka, 1977. 664 p. (in Russian).

31. Polubarinova-Kochina P.Ya., Pryazhinskaya V.G., Emikh V.N. *Matematicheskie metody v voprosakh orosheniya* [Mathematical methods in questions of irrigation]. M.: Nauka, 1969. 416 p. (in Russian).

32. *Prognozy podtopleniya i raschyot drenaznykh sistem na zastraivaemykh i zastroyennykh territoriyah / VNII VODGEO*. [Forecasts of flooding and calculation of drainage systems on the built-up and built up VODGEO'S territories] Moscow, Strojizdat, 1991. 272p. Avt.: A.ZH. Muftahov, I.V. Korinchenko, N.M. Grigor'eva, A.P. Shevchik, V.I. Sologaev. (in Russian).

Поступила 23.08.2018 , принята к публикации 22.02.2019.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сологаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «СибАДИ», проф. каф. ГСХН, 644080, Россия, г. Омск, пр. Мира 5, sologaev_vi@cdo.sibadi.org.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sologaev Valery Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Russia, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: sologaev_vi@cdo.sibadi.org).