

Neidorf Rudolf Anatol'evich – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: ran_pro@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79034722292; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Boldyreva Anna Aleksandrovna – Don state technical university; e-mail: lenivec88@mail.ru; 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, Russia; phone: +79034369850; the department of the software of computer facilities and the automated systems; post-graduate student; lecturer; International Airship Association member.

УДК 519.876.5

А.В. Малков, О.Н. Зенкина, В.И. Помеляйко, И.С. Помеляйко

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ И МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД НА КУРОРТЕ КИСЛОВОДСК

Построена математическая модель геофильтрации и миграции загрязненных грунтовых вод. Задача решается в два этапа. На первом выстраивается естественная пьезометрическая поверхность зеркала грунтовых вод при нулевых значениях техногенных утечек. Искомой величиной является активность инфильтрационного питания в каждом блоке модели. На втором этапе решается задача массопереноса с заданными техногенными нагрузками и дается прогноз распространения ореолов загрязнения на 20 летний период. Для улучшения экологической ситуации предложено создание систематической дренажной системы на наиболее подтопленных городских районах.

Математическая модель; фильтрационные свойства; миграция; грунтовые воды; подтопление; засоление.

A.V. Malkov, O.N. Zenkina, V.I. Pomelyayko, I.S. Pomelyayko

MATHEMATICAL MODEL MIGRATION AND GEOFI POLLUTED GROUNDWATER HEALTH RESORT KISLOVODSK

The paper presents the state data of ground waters federal resort Kislovodsk. Assessed the extent and nature of contamination. Identified and analyzed the main sources of pollutants in the ground water in the city. A mathematical model geofi and migration of contaminated groundwater. The problem is solved in two stages. The ground is built natural piezometric surface the water table at zero values of man-made diversions. The unknown quantity is the activity of infiltration in each block of the model. In the second step we solve the problem of mass transfer with specified development pressure and a forecast distribution of halos pollution by 20 year period. To improve the environmental situation prompted the creation of a systematic drainage system in the most flooded urban areas.

Mathematical model; filtration properties; migration; ground water; water logging; salinity.

Основой сохранения лечебных факторов курорта является удовлетворительная экологическая ситуация городского округа. В рамках проведенного системного анализа экологического состояния территории курорта было оценено состояние всех природных сред [1–3], в том числе, состояние грунтовых вод [4]. Обработка полученной информации осуществлялась при помощи математического моделирования. Задачей моделирования являлся прогноз и динамика ореолов распространения загрязняющих веществ, приуроченных к областям повышенной антропогенной нагрузки.

Предлагается математическая модель, которая позволяет улучшать экологическое состояние подземных вод.

Математическая постановка задачи. Отличительной особенностью гидро-геологического строения территории является довольно высокая обособленность верхнего горизонта грунтовых вод от нижележащих водоносных горизонтов пачкой водоупорных отложений, что позволяет рассматривать однослойную модель с инфильтрационным питанием. Система дифференциальных уравнений, описывающих процесс плоско-пространственной геофильтрации и массопереноса имеет вид [9]:

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial H}{\partial t} = kh_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + kh_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + W_k \\ n \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - W_k (C - C_k) - \Sigma R_w \end{cases} \quad (1)$$

где H – положение статического уровня, м; k, h – соответственно коэффициент фильтрации и статический напор (мощность) грунтового горизонта, м/сут., м; x, y – пространственные координаты по соответствующим осям, м; μ – гравитационная водоотдача; n – активная пористость; C – текущая концентрация солей или загрязняющих веществ в горизонте, г/дм³; C_k – концентрация веществ, поступающих с инфильтрацией, г/дм³; D_x, D_y – суммарный коэффициент гидродинамической дисперсии и молекулярной диффузии, м²/сут; V_x, V_y – скорость фильтрации по плановым координатам, м/сут; W_k – величина инфильтрационного питания, м/сут; t – текущее время, сут; ΣR_w – член, суммарно описывающий ионный обмен и химические реакции, происходящие в системе горная порода-вода, г/дм³*сут.

Рассматриваются только два основных типа химических реакций: сорбция и распад. Тогда ΣR_w может быть записано в следующем виде:

$$\Sigma R_w = \rho_b \frac{\partial \bar{C}^k}{\partial t} + \lambda_1 n \bar{C}^k + \lambda_2 \rho_b \bar{C}^k,$$

где ρ_b – объемная плотность пород, г/дм³; λ_1, λ_2 – коэффициент распада для растворенной и сорбированной фазы соответственно, сут⁻¹; \bar{C}^k – концентрация рассматриваемого вещества в сорбированной фазе, г/дм³.

Уравнение (1) дополняется условиями однозначности, или совокупностью начальных и граничных условий, определяемых конкретным объектом.

Начальные условия могут задаваться в двух постановках:

$t = 0; Q = 0; S = 0$ (S – понижение (изменение) уровня грунтовых вод)

$t = 0, Q = 0, H = H_{cm}$ (H_{cm} – статическое положение уровня в горизонте).

В первой постановке естественная поверхность зеркала грунтовых вод принимается за нулевую, и все изменения ее оцениваются в понижениях уровня, вызванных изменением водного баланса под воздействием природных или техногенных факторов. Такая постановка более предпочтительна, поскольку не требует большого объема вычислительных операций. Однако у нее есть и ряд недостатков. Это частичная потеря физической сущности геофильтрации, поскольку элементы естественного водного баланса также принимаются за нулевые, в силу чего решение задач массопереноса на таких моделях невозможно. По этой причине принята вторая постановка.

Граничные условия модели приняты в соответствии с геолого-гидрогеологическим строением. Они представлены на рис. 1. Вся речная сеть представляет собой границы с контуром постоянного напора – граничные условия (ГУ) I рода ($H = const$). Выклинивание водоносного горизонта – мощность пласта равна нулю, соответствуют закрытым границам или ГУ II рода ($Q = 0$). Решение задачи предполагается проводить численным методом по неявной схеме методом сопряженных градиентов с использованием пакета готовых программ Mod Tech. Необходимые параметры были получены в результате опытно-фильтрационных работ.

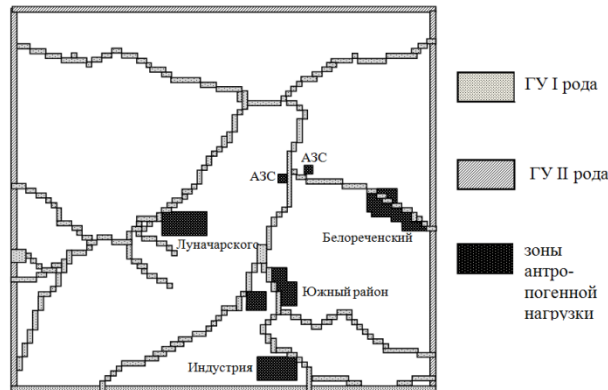


Рис. 1. Схема ГУ модели и зон интенсивной антропогенной нагрузки

Результаты моделирования. Решение выполняется численными методами. Это означает, что вместо дифференциальных уравнений в частных производных решается аналогичная система конечно-разностных уравнений, в которых дифференциалы искомой функции представлены в дискретной форме по координатам пространства и времени. Чтобы получить такую модель, исследуемая область разбивается равномерной или неравномерной сеткой на элементарные сопряженные блоки с шагом по пространственным координатам Δx и Δy , и все физические характеристики объекта в пределах выделенного блока, относят к его центру тяжести (узловой точке).

Задача решается в два этапа. На первом выстраивается естественная пьезометрическая поверхность зеркала грунтовых вод при нулевых значениях техногенных утечек. Искомой величиной является активность инфильтрационного питания в каждом блоке модели. На втором этапе решается задача массопереноса с заданными техногенными нагрузками.

Этап 1.

Учитывая, что естественный режим фильтрации является стационарным, для первого уравнения системы (1), можно записать:

$$\left(\frac{kh_{i-1}(H_{i-1,j} - H_{ji}) - kh_{i+1}(H_{i,j} - H_{i+1,j})}{\Delta x^2} \right) + \left(\frac{kh_{j-1}(H_{i,j-1} - H_{i,j}) - kh_{j+1}(H_{i,j} - H_{i,j+1})}{\Delta y^2} \right) = -W_k, \quad (2)$$

где W_k – величина инфильтрационного питания, м/сут.

Преимущества данной методики заключается в том, что для построения начального варианта модели требуется знание всего одного расчетного параметра – коэффициента фильтрации. Этот параметр наиболее точно из всех остальных определяется по результатам опытно-фильтрационных работ, что гарантирует относительно высокую точность математических построений.

Практически задача решалась следующим образом.

1. Вся область фильтрации разбивалась равномерной сеткой с шагом по плановым координатам $\Delta x = \Delta y = 100$ м. Общее количество блоков составило по оси x – 85, по оси y – 82. На сетку была нанесена гидрографическая сеть, и принятые условия на границах модели.

2. По данным буровых и геологоразведочных работ определялось глубинное строение и условия залегания водоносных и водоупорных отложений, которые отображались на модели в виде изолиний.

3. По данным опытно-фильтрационных исследований определялись параметры, характеризующие емкостные и фильтрационные свойства отложений. В модели приняты средние значения коэффициентов: $k = 0,6$ м/сут; $\mu = 0,05$.

4. Полученные расчетным путем значения W_k (рис. 3) вводятся в модель в каждый блок, и производится моделирование при достаточно большом времени t . Если расчеты выполнены корректно, то первоначальное положение пьезометрической поверхности в каждом горизонте останется неизменным.

Проверка результатов расчета проводилась на модели для различных моментов времени. Расхождения за 10 лет не превышают ± 5 см.

Этап 2.

На втором этапе моделируется миграция загрязняющих веществ, поступающих в подземные воды при антропогенном воздействии. Для решения уравнения переноса требуется знать скорости фильтрации в каждом блоке модели.

Поэтому транспортная модель связана с фильтрационной, и пространственная дискретизация транспортной модели должна точно соответствовать фильтрационной модели. Решение задачи осуществляется последовательно. Вначале по первому уравнению системы (1) вычисляются скорости геофильтрации, затем, используя второе уравнение, решается собственно задача массопереноса. Рассматривалась модель конвективно-диффузионного массопереноса. Процессы сорбции-десорбции не учитывались ($\sum R_w = 0$). Такое допущение дает несколько завышенные расчетные значения зоны миграции, но значительно упрощает процедуру расчета. В этой связи параметры, характеризующие дисперсию и диффузию – коэффициент гидравлической дисперсии, может быть принят по табличным данным. Постановка задачи следующая. Начальное распределение изучаемого вещества по площади модели принимается равным нулю. Далее, в блоках интенсивного технического воздействия задаются расчетные значения утечек и концентрация вещества равная 1,0. На интересующие моменты времени определяются ореолы распространения загрязняющих веществ. В модели приняты следующие параметры:

- ◆ эффективная пористость $n = 0,05$; начальная концентрация вещества $C = 0$ г/дм³; концентрация естественного инфильтрационного питания $C_k = 0$ г/дм³;
- ◆ концентрация изучаемого вещества $C_0 = 1,0$ г/дм³; коэффициент гидравлической дисперсии $D = 0,4$ м²/сут; параметры геофильтрации, плановая дискретизация – неизменны.

В качестве зон интенсивной техногенной нагрузки рассматривались участки расположения заправочных станций, а также городские жилые массивы, не имеющие канализованных сбросов. Величина утечек рассчитывалась следующим образом. Число не канализованных абонентов в Кисловодске составляет 40 % (54099 человек). Среднее потребление воды, исходя из нормативных документов [6], принимаем равным 200 л/сут. на человека, получаем количество стоков $54099 * 200 = 10820$ м³/сут. Общий вывоз не канализованных стоков составляет около 400 м³/сут. Количество некондиционных вод ежедневно сливаемых в реки и на почвы, а также уходящих в нижележащие горизонты составляет – $10820 - 400 = 10420$ м³/сут. Полученные стоки далее распределялись между не канализованными районами города исходя из количества проживающих на их территории жителей. Средняя величина утечек составляет 41,9 м³/га – эта цифра и была использована при моделировании. Результаты миграции загрязняющих веществ на $t = 20$ лет представлены на рис. 2.

Выводы.

1. За 20-летний период ореолы распространения поллютантов увеличиваются более чем в два раза.

2. Движение поллютантов соответствует направлению потока подземных вод на северо-восток.

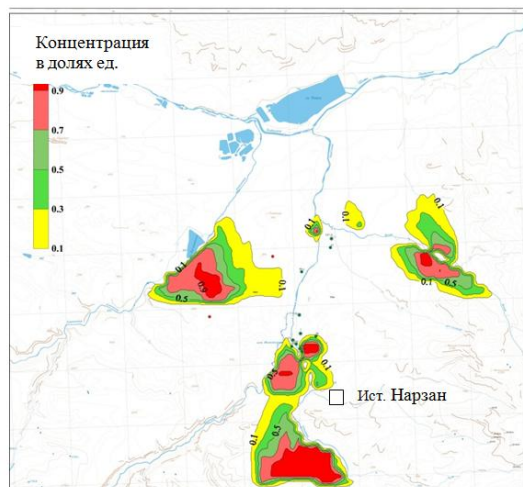


Рис. 2. Результаты моделирования процессов миграции загрязнителей

3. Выполненные расчеты и особенности геолого-гидрогеологического строения указывают, что особенно опасными являются не канализованные участки, расположенные в южной части города, где грунтовые воды находятся в гидравлической связи с водоносными горизонтами, содержащими минеральные воды. Этим в частности объясняется стабильное бактериологическое загрязнение источника Нарзан.

4. Существенного улучшения экологического состояния подземных вод можно достичь путем создания систематической дренажной системы с глубиной заложения ниже уровня максимальной активности испарения с зеркала грунтовых вод, т.е. – 3,0–5,0 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Помеляйко И.С. Проблемы современного состояния гидроминеральной базы курорта Кисловодск // Научная мысль Кавказа. – 2011. – № 3. – С. 90-96.
2. Помеляйко И.С. Оценка эколого-геохимического состояния пород зоны аэрации курорта Кисловодск // Геология и разведка. – 2012. – № 2. – С. 42-48.
3. Помеляйко И.С., Помеляйко В.И. Оценка экологической ситуации на курорте Кисловодск // Научное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 147-159.
4. Помеляйко И.С. Математическая модель геофильтрации и миграции загрязненных грунтовых вод с целью оценки площадей загрязнения // Математическая физика и её приложения (МФП–2012) // Международная молодежная научная конференция 28.06-30.06.2012 г. Пятигорск / Сборник докладов. Изд-во СКФУ, 2012 г. – Т. 3. – С. 141-148. (В пяти томах).
5. Справка об уровне канализования г. Кисловодска / Кисловодский «Водоканал», 2010. – 1 с.
6. Положения о территориальном планировании городского округа города-курорта Кисловодска: Пояснительная записка / ОАО « Гипрогор». Руководитель М.Ю. Грудинин. – М., 2010. – С. 49-50.
7. Малков А.В., Першин И.М., Помеляйко И.С. Оценка эксплуатационных запасов минеральных вод Северного участка Кисловодского месторождения по состоянию на 2005 г. / Отчет в 3 т. – Кисловодск, 2006.
8. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. – М.: Наука, 2003. – 384 с.
9. Малков А.В., Першин И.М. Системы с распределенными параметрами. Анализ и синтез. – М.: Научный мир, 2012. – 476 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

Малков Анатолий Валентинович – Общество с ограниченной ответственностью «Нарзан-гидроресурсы»; e-mail: Anatol.Malkov@yandex.ru; 357700, Ставропольский край, г. Кисловодск, ул. Кирова, 43; тел.: 88793729139; директор, кандидат геолого-минералогических наук; д.т.н.

Зенкина Ольга Николаевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: olga.n72@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шаумяна, 8-6; тел.: +78986250925; магистрант кафедры синергетики и процессов управления.

Помеляйко Василий Иванович – Группа компаний Danon-Юнимилк в России, филиал «Молочный Комбинат «ЛИПЕЦКИЙ»; e-mail: v.pomelyayko@gmail.com; 398000, Липецкая область, г. Липецк, ул. Катукова, 1; тел.: 884742429545; главный инженер

Помеляйко Ирина Сергеевна – Общество с ограниченной ответственностью «Нарзан-гидроресурсы»; e-mail: irinapomelyayko@rambler.ru; 357700 Россия, Ставропольский край, г. Кисловодск, ул. Кирова, 43; тел.: 88793729139; инженер-гидрогеолог

Malkov Anatoliy Valentinovich – Limited Liability Company “Narzan-hydroresources”; e-mail: Anatol.Malkov@yandex.ru; 43, Kirov street, Kislovodsk, Stavropol region, 357700, Russia; phone: +78793729139; director; cand. of geological and mineralogical sc., dr. of eng. sc.

Zenkina Olga Nikolaevna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: olga.n72@mail.ru; 8-6, Shaumiana street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78986250925; master degree student of the department of synergetics and control processes.

Pomelyayko Vasilii Ivanovich – Group Danone-Unimilk in Russia, a subsidiary of "Dairy Plant" Lipetsk "; e-mail: v.pomelyayko@gmail.com; 1, Katukova Street, Lipetsk, Lipetsk region, 398000, Russia; phone: +784742429545; chief engineer.

Pomelyayko Irina Sergeevna – Limited Liability Company “Narzan-hydroresources”; e-mail: irinapomelyayko@rambler.ru; 43, Kirov street, Kislovodsk, Stavropol region, 357700, Russia; phone: +78793729139; hydrogeology-engineer.

УДК 681.513

Н.К. Полуянович, Ю.П. Волощенко, И.И. Шушанов

**АНАЛИЗ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ТЯГОВЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЧЕРЕЗ
КОНТАКТНУЮ СЕТЬ***

Приводятся результаты численных экспериментов с использованием многошагового метода Адамса-Бэшфорта-Мултона PECE с переменным шагом, который позволяет достигать необходимую точность численного решения при приемлемых затратах вычислительных ресурсов, а также отвечает требованиям предъявляемым к методам решения жестких систем дифференциальных уравнений. Обобщена структура и рассчитано КПД рекуперации при взаимодействии тяговых электроприводов двух электроподвижных составов через контактную сеть.

Тяговый электропривод; электроподвижной состав; рекуперация энергии.

* Работа поддержана грантом РФФИ №12-08-13112 офи_м_РЖД «Разработка методов оптимизации энергопотребления электропоездов в динамических режимах на базе комплексной системы управления движением и энергоснабжением».