Моделиране миграцията на много подвижен замърсител в подповърхностното пространство на индустриални площадки

Николай Стоянов¹

¹University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski“, Sofia, Bulgaria; e-mail: nts@mgu.bg

Stoyanov, N. 2018. Mass-transport modeling of a fast-moving contaminant in the subsurface area of industrial sites. *Engineering Geology and Hydrogeology*, 32, 13-22.

Резюме. Изследвани са условията за разпространение на много подвижен замърсител в подповърхностното пространство на индустриална площадка чрез симулиране на мащабно разливане по терена на замърсени води в един по-продължителен период. Примерният обект е ситуиран в източната част на гр. Карлово, Южна България. В приповърхностния разрез са диференцирани няколко нискорангови хидрогеоложки единици, като е приложен комплекс от хидрогеоложки методи и техники, включващи проучвателно сондиране, експресни опити и лабораторни индикаторни опити. Посредством двумерни (2D) математически модели са симулирани условията за миграция на много подвижен замърсител в зоната на аерация и водонаситената зона. Използван е детерминистичен подход за моделиране на установените в масива нискорангови хидрогеоложки единици. Всяка единица е представена като двумерен обект с дефинирани граници и характеристики. Разработените с компютърна програма VS2DTI модели отчитат конвективния пренос на вещество, обратното елиминирание (сорбция-десорбция), хидродинамичната дисперсия, молекулярната дифузия и смесването. С тях е направена прогноза за развитието на миграционните процеси до дълбочина 15-20 m при продължително действаш повърхностен източник. Въз основа на различни моделни решения е направена оценка на защитния ефект на изкуствената настилка и геоложката основа на индустриалната площадка. Показано е, че бетоновата настилка обезпечава сигурна защита срещу инфилтрирането на повърхностни замърсители.

Ключови думи: замърсяване на подземните води, миграционен модел, зона на аерация, много подвижен замърсител, техногенно замърсяване.

Abstract. The conditions for spreading of a fast-moving contaminant in the subsurface were studied at an industrial site where large amounts of contaminated water had been discharged over a relatively long period of time. The site is located in the eastern part of the town of Karlovo in Southern Bulgaria. Several hydrogeological units were distinguished in the near-surface following the application of hydrogeological methods and techniques, including investigative drilling, slug tests and laboratory tracer tests. Two-dimensional (2D) mathematical models were used to simulate the mass-transport of a fast-moving contaminant in the unsaturated and saturated zones. A deterministic modelling approach was applied in simulating the established hydrogeological units. Each unit was represented as a two-dimensional object with distinct boundaries and properties. The models were set up using VS2DTI software simulating convective mass transport, reversible elimination (sorption/desorption), hydrodynamic dispersion, molecular diffusion and mixing. The models were used for predicting the contaminant migration from a continuous source on the surface to a depth of 15-20 m. Different model solutions were used to assess the protective effect of the man-made cover and subsurface geology at the industrial site.

Keywords: groundwater pollution, mass-transport model, unsaturated zone, fast-moving contaminant, industrial contamination.

Въведение

Замърсяването на подземните води и почвите в урбанизираните територии и индустриалните зони е много сериозен екологичен проблем предвид големия мащаб на явлениято и непрекъснатото намаляване на почвения фонд и водните ресурси на планетата. В тази връзка, голям брой от научните и специализирани изследвания в България са фокусирани върху природните и техногенни условия, определящи скоростта и възможния обхват на процесите на замърсяване от различни повърхностни източници. Основни теми са показателите и съответните критерии за оценка на размерите и интензивността на замърсяване; методите на изследване и опитните резултати за миграционните характеристики на различни замърсители; математическите модели на движението на замърсители в зоната на аерация и водоносните пластове (Benderev et al., 2003, 2009, 2017; Galabov, Pentchev, 1984, 1986; Galabov et al., 1999; Pentchev, Velikov, 1979; Stoyanov, 2003, 2004, 2006, 2012, 2013 и много други). Обща тенденция е да се прилагат конвенционални техники, подходи и методи, използвани в теорията на филтрацията и преноса на вещество, при отчитане спецификата на всеки обект. В последните десетилетия широко се използват и различни програмни продукти за моделиране поведението на замърсители - MODFLOW и фамилия (MT3D-MS, MODPATH и др.), FEFLOW, VS2DTI, HYDRUS и пр. (Gerginov et al., 2017; Stoyanov, 2003, 2005, 2009, 2010, 2015; Stoyanov, Dimovski, 2004; Stoyanov, Gyurov, 2005 и др.).

Главна цел на настоящето изследване е количествена прогноза и оценка на риска от замърсяване на почвата и подземните води с много подвижен замърсител от индустриална площадка. Конкретните задачи са дефинирани така, че техните решения да дадат точна оценка на задържащата способностна геоложката основа, защитния ефект от бетоновата настилка на площадката и потенциалния риск от замърсяване.

Кратка хидрогеоложка характеристика на изследвания обект

В регионален план изследваният обект попада в северните части на неоген-кватернерния водоносен комплекс, развит в пределите на Карловската котловина. Локално, изследването обхваща малък участък в горната част на кватернерния водоносен хоризонт, разположен в източната периферия на гр. Карлово.

Водоносният хоризонт е формиран в пролувиалния конус на Стара река, изграден от грубосортирани чакъли и валуни с пясъчливо-глинест запълнител, прослоени от глинести и пясъчливи лещи. Долният водоупор е изграден от неогенски глин и палеозойски гранити. Посоката на подземния безнапорен поток е на юг – югозапад (фиг. 1), а средният хидравличен градиент е около 0,005. Нивата на подземните води са на дълбочина 9-11 m под терена. Коефициентът на филтрация варира в диапазона от 1 до 30 m/d, а коефициентът на водоотдаване е най-често в границите от 0,15 до 0,25. Подхранването на водоносния хоризонт е основно от многото спускащи се по южния склон на Стара планина реки и потоци, както и от инфилтрация на валежни води.

В обсега на индустриалната площадка подземните води са в пряка хидравлична връзка с р. Голяма Никуличница, ляв приток на Стара река. Средната kota на речното ниво в изследвания участък е около 420-425 m, надлъжният наклон – 0,048, а максималните стойности на речния отток са в диапазона от 90 m³/s с обезпеченост 0,1 % до 18,6 m³/s с обезпеченост 50 %.

Методика и инструменти на изследване

Използваният методически подход включва: (а) Съставяне на концептуален модел на миграционното поле от източника до първия потенциален реципиент,

Фиг. 1. Местоположение на изследвания обект. Пиезометрична карта.

1 – Индустриална площадка; 2 – Повърхностен източник на замърсяване; 3 – Профил I-I; 4 – Проучвателен сондаж №; 5 – Речен пункт №; 6 – Пиезометрична линия.

Fig. 1. Location of the study area. Piezometric map.

1 – Industrial site; 2 – Surface source of contamination; 3 – Cross-section I-I; 4 – Borehole №; 5 – River gauge station №; 6 – Piezometric isoline

с отчитане природата на потенциалния замърсител; (б) Разработване на 2D модели на условията за движение на много подвижен замърсител по примера на хлоридния йон (Cl^-), с които се симулира инфилтриране на силно замърсени води от индустриалната площадка.

За характеризиране на миграционното поле в района на обекта са проведени ограничен обем специализирани изследвания - хидрогеоложки оглед, сондажно проучване, полеви филтрационни тестове и лабораторни индикаторни опити в колони. При огледа са дефинирани основният източник на замърсяване, първият възможен приемник и площните граници на миграционното поле, регистрирани са и водните стоежи в пет речни пункта. Сондажното проучване включва изграждане на три сондажа с дълбочина 8 m, документиране на преминатия разрез и нивата на подземните води. В сондажите поинтервално са проведени 4 експресни опита (едно водоналиване и три водочерпения) с цел определяне коефициента на филтрация k на отделените в разреза нискорангови хидрогеоложки единици. Опитните данни са обработени по класическите методи на Ернст и Веригин (Galabov, Stoyanov, 2005). Проведени са индикаторни опити в колони за определяне на сорбционната порестост n_s и надлъжната дисперсивност

α_d на литоложки разновидности спрямо *Ct*. Идентификацията на параметрите е направена, като експерименталните криви са обработени с програма LTT1DPI (Stoyanov, 2006). Въз основа на резултатите от изследванията е съставен общ концептуален модел на миграционното поле от емитера на замърсяване (площадката) до първия потенциален реципиент (реката).

Математическите 2D модели на условията за движение на замърсителите в среда с променлива водонаситеност са съставени с програма VS2DTI-v.1.3, разработена по поръчка и разпространявана безплатно от U.S. Geological Survey. Алгоритъмът на програмата използва числов модел по крайни разлики за решаване на уравнението на потока и конвективно-дисперсионното уравнение (Bear, 1979 и др.). Подробна информация относно използвания математически апарат и методически указания за нейното прилагане са дадени в Lappala et al. (1987), Nealy (1990), Hsieh et al. (2000) и др. С програма VS2DTI-v.1.3 са съставени три модела. Използваните в тях работни хипотези са обобщени в табл. 1. Първите два модела имат за цел да се оцени количествено естествено защитеността на геоложката среда, съответно без отчитане на нейната сорбционната способност и с нейното отчитане. С третия модел се оценява защитната роля на бетоновата настилка, изпълняваща роля на инженерна бариера.

Таблица 1. Работни хипотези в математическите модели

Table 1. Working hypotheses adopted as a guide in mathematical models

Модел	Инженерна бариера	Миграционни процеси				
		Конвективен пренос	Сорбция	Молекулярна дифузия	Механична дисперсия	Смесване
1	Няма	Да	Не	Да	Да	Да
2	Няма	Да	Да	Да	Да	Да
3	Бетонова настилка	Да	Да	Да	Да	Да

Концептуален модел – характеризиране на миграционното поле

Общата концептуална схема, която е използвана при съставянето на трите модела, съдържа следните изходни позиции:

Миграционно поле. Обхваща частта от приповърхностния разрез, където е възможно да мигрират замърсители от предварително определения източник до първия евентуален приемник. В случая източник на замърсяване е индустриалната площадка, а първи приемник - р. Голяма Никуличница (фиг. 1). Основните причини за направеното допускане са: (1) Реката е в непосредствена близост до източника – на около 60-70 m; (2) Нивата на подземните води в района на емитера са на 3-4 m над реката.

Моделна област. Част от миграционното поле, попадаща в границите на хидрогеоложкия разрез по профил I-I (фиг. 1 и фиг. 2). Профилът е ориентиран по най-късата токова линия между емитера и реципиента.

Хидрогеоложки единици. По данни от сондажното проучване в разреза отгоре надолу са отделени две нискорангови хидрогеоложки единици – Слабо пропусклив антропогенен пласт (строителен насип от глина) с дебелина от 1,5 до 2 m; Слабо водоносен пласт, изграден от много силно заглинени валуни, чакъли и пясъци с обща дебелина над 7 m. Високото съдържание на глинеста фракция е предпоставка за изключително ниската водопропускливост на тази хидрогеоложка единица. Бетоновата настилка (инженерната бариера), макар и изкуствена формация, в моделните изследвания се разглежда също като нискорангова хидрогеоложка единица със съответните филтрационни и миграционни характеристики. Проектната ѝ дебелина е 0,18 m.

Фиг. 2. Граници на моделните зони и гранични условия в Модели 1, 2 и 3.

1 – Слабо пропусклив антропогенен пласт (насип от глина); 2 – Слабо водоносен пласт (силно заглинени пролувиални седименти); 3 – Бетонена настилка (инженерна бариера); 4 – Инфилтрация на валежни води; 5 – Инфилтрация на замърсени води; 6 – Ниво на подземните води.

Fig. 2. Boundaries of model areas and boundary conditions in Model 1, 2, and 3.

1 – Low permeable anthropogenic layer (clay embankment); 2 – Poor aquifer (predominantly clayey proluvial sediments); 3 – Concrete flooring (engineering barrier); 4 – Infiltration of rainwater; 5 – Infiltration of contaminated water; 6 – Groundwater level.

Хидрогеоложки параметри. Коефициентът на филтрация k , коефициентът на разпределение K_D (респ. n_s) спрямо Ct , надлъжната дисперсивност α_L , както и физичните характеристики: плътност на скелета ρ_d и порестост n на слабо пропускливия антропогенен пласт и слабо водоносния пласт са определени по данни от проведените изследвания (филтрационни тестове, индикаторни опити в колони, зърнометрични и физични анализи и пр.). Полевите тестове са изпълнени в изградените на индустриалната площадка проучвателни сондажи, а индикаторните опити и анализите са проведени в МГУ с взети при сондирането земни проби. Приетият k на инженерната бариера е съобразен със зададените в проектната документация стойности за бетона $1,0 \text{ E-}03 \text{ m/d}$. Миграционните характеристики (K_D , α_L и D_M) на хидрогеоложките единици и инженерната бариера, които не са лабораторно определени, са изчислени чрез корелационни преходи с цитираните в специализираната литература данни за изграждащите ги литоложки разновидности (Adams, Gelhar, 1992; Lekhov, 2010; Spitz, Moreno, 1996; Stoyanov, 2003 и др.). Приетите изчислителни стойности на физичните, филтрационните и миграционните характеристики са представени в табл. 2.

Таблица 2. Филтрационни и миграционни характеристики на хидрогеоложките единици
Table 2. Hydraulic and mass transport characteristics of hydrogeological units

Хидрогеоложка единица	Плътност на скелета ρ_d , mg/m^3	Коеф. на филтрация k , m/d	Коеф. на разпределение K_D , m^3/mg	Надлъжна дисперсивност α_L , m	Коеф. на дифузия D_M , m^2/d
Слабо пропусклив антропогенен пласт	1,7E+09	5,0E-02	2,70E-10	2,5E00	2,0E-04
Слабо водоносен пласт	1,8E+09	3,0E-02	1,78E-10	1,2E00	3,0E-04
Бетонена настилка	1,9E+09	1,0E-03	3,00E-10	1,0E-03	1,0E-04

Граница между ненаситената и водонаситената зона. Определена е по данни от измерените нива в проучвателните сондажи. На фиг. 2 пиезометричната линия, която маркира границата между двете зони, е изобразена с прекъсната синя линия.

Инфилтрационно подхранване от валежите

Скорост на инфилтрация W . Съставеният воден баланс при приети по данни на ХМС Карлово средногодишна сума на валежите 680 mm и средногодишна температура на въздуха 11,9° C показва, че общият отток (повърхностен и подземен) е 186 mm/a. Оттук инфилтрацията, изчислена по Bredencamp (1990) за слабопроницаеми почви, е 57 mm/a. При тези условия е прието, че W е $1,56 \cdot 10^{-4}$ m/d по цялата площ на модела, извън площите с бетонова настилка.

Концентрация на Cl^- в атмосферните валежи. С известна условност е прието, че съдържанието на Cl^- в атмосферните води е съвсем нищожно, т.е. $c = 0$ mg/l.

Повърхностен източник на замърсяване. В трите модела е изследвано поведението на много подвижните замърсители по примера на Cl^- . Основните мотиви те да бъдат ползвани като маркери при изчисленията и количествените оценки са: (1) поради своята консервативност хлоридите (Cl^-) са изключително подвижни и очертават максималния обхват на възможното замърсяване в подповърхностното пространство; (2) концентрацията на Cl^- в замърсените води е висока. Приетата работна хипотеза за режима на постъпване на повърхностните замърсители в подповърхностното пространство е следната:

Скорост на инфилтрация на замърсени води W_p . При отсъствие на настилка, замърсените води ще се инфилтрират с определената в естествени условия скорост, т.е. $W_p = W = 1,56 \cdot 10^{-4}$ m/d. При наличие на бетонова настилка, скоростта на замърсените води W_p е определена след предварително проиграване на голям брой моделни варианти, включващи вариране на нейните стойности при равни други условия. Установено е, че моделните решения са устойчиви при W_p не по висока от $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/d.

Концентрация на Cl^- в замърсените води c_p . С голям инженерен запас се приема, че концентрацията на Cl^- в постъпващите от индустриалната площадка замърсени води е висока – $c_p = 1000$ mg/l. Приема се и консервативната хипотеза, че безконтролно изтичане на замърсени води ще продължи една година. Предполага се, че след това източникът на повърхностното замърсяване ще бъде ликвидиран.

Композиране на математическите модели

Математическите 2D модели са съставени с програма VS2DTI-v.1.3 съобразно основните положения в концептуалния модел. С тях се симулира поведението на Cl^- в разреза по профила, представен на фиг. 1. Детерминирани нискорангови единици в Модел 1 и Модел 2 са симулирани с две моделни зони, а в Модел 3 – с три (фиг. 2). Всяка зона е зададена с геометрия, филтрационни и миграционни характеристики, отговарящи на реалните (табл. 2). При пространствената дискретизация е използвана ортогонална мрежа с размери на клетките 0,5x0,1 m. Връзката между всмукващия потенциал, съдържанието на влага и коефициента на влагопроводност е моделирана с функциите на van Genuchten (1980), за параметрите RMC (Residual Moisture Content), α и β са таблични стойности за подобен тип среда. За моделиране на реакциите между течната и твърдата фаза е използвана линейната изотерма на Henry. Границата между ненаситената и водонаситената зона е зададена, съобразно установените в сондажите водни нива. Общото време за симулация (100 години) е разделено на 100 стрес периода. Зададените гранични условия по горната граница на моделната област са илюстрирани на фиг. 2. Източникът на повърхностно замърсяване е зададен да действа през първия стрес период, т.е. в продължение на една година.

Резултати от моделните изследвания

В края на всеки стрес период е направена прогноза за размерите и степента на възможното замърсяване. Получените със съответния модел решения са

Фиг. 3. Модел 1 – Конвективна схема, без бетонова настилка. Прогнозни решения в изчислителни времена 1, 5, 10, 20, 30 и 40 години.

Fig. 3. Model 1 – Convective scheme, without concrete flooring. Prognostic solutions calculated for periods of 1, 5, 10, 20, 30, and 40 years.

Фиг. 4. Модел 2 – Конвективно-елиминационна схема, без бетонова настилка. Прогнозни решения в изчислителни времена 1, 5, 10, 20, 30 и 40 години.

Fig. 4. Model 2 – Convective-reversible elimination scheme, without concrete flooring. Prognostic solutions calculated for periods of 1, 5, 10, 20, 30, and 40 years.

Фиг. 5. Модел 3 – Конвективно-елиминационна схема, с бетонова настилка. Прогнозни решения в изчислителни времена 1, 5, 10, 20, 30 и 40 години.

Fig. 5. Model 3 – Convective-reversible elimination scheme, with concrete flooring. Prognostic solutions calculated for periods of 1, 5, 10, 20, 30, and 40 years.

илистрирани с по шест профила с различно разпределение на концентрациите на Cl^- в дълбочина, представящи обхвата и степента на замърсяване на подповърхностното пространство в изчислителни моменти 1, 5, 10, 20, 30 и 40 години (фиг. 3, 4 и 5). За изчислителни моменти над 40 години профили не са представени, тъй като концентрациите на Cl^- много намаляват и достигат близки до нулата стойности.

Сравнението на резултатите от моделите показва, че бетоновата настилка с дебелина 0,18 m обезпечава сигурна защита срещу инфилтрирането на повърхностни замърсители /Модел 3/ при условие, че няма разливи на замърсената вода извън бетонираната площадка и че бетонът не е напукан.

Заклучение

Геоложката среда се характеризира с ниска водопропускливост, много слаба водообилност и добра задържаща способност, но не би могла сама да обезпечи висока естествена защита срещу потенциални повърхностни замърсители. Все пак тя несъмнено притежава необходимите характеристики и е в състояние значително да забави развитието на миграционните процеси, респ. да ограничи обхвата и степента на евентуалното замърсяване на почвите и подземните води. Бетоновата настилка обезпечава сигурна защита срещу инфилтрирането на повърхностни замърсители от територията на индустриалната площадка. От тази гледна точка еднозначно следва да се направи изводът, че функционирането на обекта не създава реална опасност от замърсяване на подземните води, респ. на разположени в съседство водоизточници, повърхностни водоеми, реки или съседни водоносни хоризонти.

- Adams E. E., L. W. Gelhar. 1992. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer. 2. Spatial moments analysis. *Water Resour. Res.*, 28 (12), 3293-3307.
- Bear J. 1979. *Hydraulics of groundwater*. New York, McGraw-Hill, 569 p.
- Benderev, A., E. N. Pentcheva, E. Hrisheva. 2003. Ecological problems of geological environment caused by activity of metallurgical plant "KCM" (Bulgaria) and NATO SIF project study. In: *"Approaches to handling environmental problems in the mining and metallurgical regions of NIS countries"*. (ed. W.L. Filho, I.Butorina) *NATO Sciences Series. IV. Earth and Environmental Sciences*, v. 20, Kluwer Academic Publishers Netherlands, 123-137.
- Benderev, A., V. Spasov, N. Kostova, Ts. Kotsev, V. Nikolov, A. Mitev, V. Stoyanova, E. Damyanova, K. Kroumova, I. Pandurski, A. Toteva, M. Trayanova. 2017. Arsenic contamination of Kobilyak karst spring, NW Bulgaria – state and reasons. *National conf. with intern. participation „GEOSCIENCES 2017“*, Sofia, 133-134 (in Bulgarian, with English abstract).
- Bredenkamp, D. B. 1990. Quantitative estimation of groundwater recharge by means of a simple rainfall-recharge relationship. In: D. N. Lerner, A. S. Issar, & I. Simmers, eds. *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge (IAH Memoir, Vol. 8)*, 247-256.
- Benderev, A., B. Mihaylova, Th. Kerestedjian, R. Atanassova, V. Singh. 2009. Assessment of the environmental conditions in the area of KCM Plovdiv smelter, after the measures undertaken for remediation and protection. *National conf. with intern. participation „GEOSCIENCES 2009“*, Sofia, 123-124 (in Bulgarian, with English abstract).
- Galabov, M., N. Stoyanov, M. Panayotova. 1999. Studies on the migration characteristics of some landfill pollutants in groundwater. *Ann. UMG, Vol. XLII, Part I, Geol.*, 103-108 (in Bulgarian, with English abstract).
- Galabov, M., N. Stoyanov. 2005. *Groundwater dynamics*. Publishing house „V. Nedkov“, Sofia, 202 p. (in Bulgarian).
- Galabov, M., P. Penchev. 1984. To the methods of determination of hydrogeological parameters of mass transport in aquifers. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 2, 221-230. (in Russian, with English abstracts)
- Galabov, M., P. Pentchev. 1986. *Solution of applied hydrogeological problems by computers*. Sofia, Technica Publ. House, 374 p. (in Bulgarian, with English abstract).
- Gerginov, P., A. Benderev, D. Antonov, T. Kotsev, V. Asenova. 2017. Groundwater dynamics and Arsenic migration in the saturated zone of Ogosta River terrace. *Engineering Geology and Hydrogeology*, 31, 53-64 (in Bulgarian, with English abstract).
- Healy R.W. 1990. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the u.s. geological survey's computer program VS2D. *USGS, Water-Resour. Inv. Rep. 90-4025*, Colorado, 125 p.
- Hsieh P.A., W. Wingle, R.W. Healy. 2000. VS2DI - A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media. *USGS, Water-Resour. Inv. Rep. 99-4130*, Lakewood, Co, 1-16.
- Lappala E.G., R.W. Healy and E.P. Weeks. 1987. Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. *USGS, Water-Resour. Inv. Rep. 83-4099*, Colorado, 184 p.

- Lekhov, A.V. 2010. Physical and chemical hydrogeodynamics. KDU, Moscow, 500 p. (in Russian)
- Pentchev, P., B. Velikov. 1979. Methodological aspects of the laboratory analysis of some basic physicochemical and hydrodynamic parameters of pollutants in groundwater. *Hydrotechnics and irrigation*, 10, 22-24 (in Bulgarian, with English abstract).
- Spitz, K., J. Moreno. 1996. *A practical guide to groundwater and solute modeling*. JW&S, Inc., NY, 460 p.
- Stoyanov, N. 2003. *Estimation and prognostication of groundwater pollution caused by sanitary landfills*. PhD Thesis, Sofia, University of Mining and Geology, 215 p. (in Bulgarian).
- Stoyanov, N. 2004. A hydrochemical method for estimating groundwater contamination. *Geology and mineral resources*, 6, 27-34 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N. 2005. Mathematical model of the conditions determining the movement of pollutants in the subsurface area of the site for temporary deposition of waste materials "Kremikovtsi". *J. "BULAQWA"*, 4, 47-53 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N. 2006. Estimation of transport parameters porous medium derived from laboratory column tests data. *J. "BULAQWA"*, 2, 36-41 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N. 2009. Prognostication of mass-transport of radionuclides in the loess complex in the region of NPS "Kozlodui". *Ann. UMG, Vol.52, Part I, Geol. and Geoph.*, 159-164 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N. 2010. Mass transport conditions for nonsorptive pollutants in the unsaturated zone of paleogene volcanics in Haskovo city region. Part 2. Mathematical model. *Ann. UMG, Vol.53, Part I, Geol. and Geoph.*, 169-173 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N. 2012. Estimation of transport parameters of porous medium according to data derived from tests performed with impulse input of tracer. *Ann. UMG, Vol.55, Part I, Geol. and Geoph.*, 134-139 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N. 2013. Estimation of mass transport parameters taking into account the regional hydro-dispersion in case of an impulse input. *Ann. UMG, Vol.56, Part I, Geol. and Geoph.*, 173-178 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N. 2015. Mathematical modelling studies for assessing the protective effect of the isolating clay layer and the retention capacity of the geological basis of landfills. *Ann. UMG, Vol.58, Part I, Geol. and Geoph.*, 184-189 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N., Ch. Gyurov. 2005. Mathematical model of the movement of pollutants in the unsaturated zone. *Geology and mineral resources*, 3, 3-8 (in Bulgarian, with English abstract).
- Stoyanov, N., St. Dimovski. 2004. A simplified approach for modeling of groundwater pollution caused by the sanitary landfill of the city of Plovdiv, Bulgaria. *"Univesitaria Ropet 2004", Petrosani, Romania*, 104-109.
- van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44 (5), 892-898.

Постъпила: 12.02.2018
 Приета: 17.08.2018

Received: 12 February 2018
 Accepted: 17 August 2018