

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЦИРКУЛАЦИОННА СОНДАЖНА СИСТЕМА ЗА ДОБИВ НА ГЕОТЕРМАЛНА ЕНЕРГИЯ

Николай Т. Стоянов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; nts@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Предложен е общ подход за оразмеряване на параметрите и експлоатационния режим на дискретна сондажна система за добив на геотермална енергия. Хидродинамичното оразмеряване на вододобивните и инжекционните сондажни кладенци се базира на числов 3D филтрационен модел на засегнатата част от подповърхностното пространство. Температурата на изчерпваната вода се прогнозира посредством едномерни аналитични модели, отчитащи топлофизичните характеристики на филтрационната среда и топлинния режим на инжекционните кладенци. Изчисленията се правят с компютърна програма след предварителна трансформация на полученото с филтрационния модел тримерно разпределение на напорите, градиентите и скоростите на подземния поток в условията на експлоатация на циркулационната система. Предложеният общ подход е илюстриран със сондажната геотермална система на фирма "Сентелион", изградена в неоген-кватернерния водоносен комплекс на територията на ж.к. Дружба, гр. София.

MATHEMATICAL MODELING STUDIES FOR DESIGN OF A CIRCULATION WELL SYSTEM FOR EXTRACTION OF GEOTHERMAL ENERGY

Nikolay T. Stoyanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; nts@mgu.bg

ABSTRACT. A general approach is proposed for calculating the parameters and the mode of exploitation for a discrete well system for extraction of geothermal energy. The hydrodynamic design of the production and the injection wells is based on a numerical 3D filtration model of the affected subsurface area. The temperature of the obtained water is predicted by one-dimensional analytical models that take into account the thermophysical characteristics of the filtration medium and the thermal regime of the injection wells. The calculations are made by a computer program after a preliminary transformation of the derived by the filtration model three-dimensional distribution of pressures, gradients, and velocities of the groundwater flow for the conditions of exploitation of the circulatory system. The proposed general approach is illustrated by the well geothermal system of the company "Sentelion", constructed in the Neogene-Quaternary aquifer complex on the territory of Druzhdaba quarter, Sofia.

Въведение

В последните години у нас има все по-силен интерес към добива на геотермална енергия (ГТЕ) от подземните води не само с оглед на използването ѝ в различни сфери на икономиката (промишленост, селско стопанство, туризъм и т.н.), но и за по-ефективно обезпечаване на енергийните потребности на населението. Реализацията на подобни проекти прави актуален въпроса, свързан с изграждането и експлоатацията на циркулационни сондажни системи, включващи два или повече водочерпателни и инжекционни сондажа. С водочерпателните сондажи от водоносния пласт се изчерпва определено количество пластова вода, което последователно преминава през топлообменници и вече отработената вода се връща в пласта посредством инжекционните кладенци. В зависимост от това дали топлообменникът е свързан с отоплителни или с охлаждателни съоръжения, то и температурата на пластовата вода може да е по-висока или по-ниска от температурата на отработената. Основните задачи при проектирането на този тип системи са свързани главно с оптимизиране на експлоатационния режим на сондажите.

Изчисленията се правят при отчитането на редица лимитиращи експлоатацията на системата условия:

- природни – геометрични, филтрационни и топлофизични характеристики на водоносния пласт, дълбочина на водното ниво, температура на пластовата вода, връзки с повърхностни води и със съседни водоносни пластовете;
- технологични – разположение и конструкция на сондажите, сумарен дебит на системата, температура на отработената вода, режим на топлообменника, работещи в близост вододобивни или дренажни съоръжения;
- екологични (допустими нива в пласта, температура и състав на отработената вода).

Намирането на оптимални решения на тези задачи без средствата на математическото моделиране е много трудно, а в случай на по-сложни лимитиращи условия е на практика невъзможно. Предложеният общ подход за оразмеряване на параметрите и режима на циркулационна сондажна система за добив на ГТЕ включва: (1) тримерни модели за определяне на хидродинамичния режим на сондажите и на структурата на филтрационното поле (2) трансформации на тримерното разпределение на

напорите във водоносния пласт в едномерно; (3) прогноза за температурния режим във водочерпателните кладенци с помощта на едномерни топлинни модели и метода на еквивалентните токови ленти (МЕТЛ) при отчитане на топлофизичните характеристики на пласта и топлинния режим на инжекционните сондажи.

Предложеният общ подход е представен по примера на проведените моделни изследвания за оразмеряване на циркуляционната сондажна система на фирма "Сентелион". Системата е изградена в кватернерния водоносен хоризонт на територията ж.к. Дружба, гр. София. Моделните изследвания са базирани на данни от проекта за водоснабдяване на термо-помпената климатична инсталация на фирма "Сентелион" и на отчетните доклади за сондажните работи и водочерпателните тестове. Използвана е и обобщена информация за изграждането и експлоатацията на намиращите се в близост до обекта кладенци (по непубликувани фондови материали от архива на МОСВ и Столична община).

Методика и инструменти

Математическите моделни изследвания за оразмеряване на циркуляционни сондажни системи за добив на ГТЕ по принцип включва решаване на две основни задачи:

- **Филтрационна задача.** Решава се с помощта на тримерен (3D) хидрогеоложки числов модел на участък от водоносния хоризонт, в който е ситуирана сондажната система. Моделът симулира работата на сондажите при различни експлоатационни режими. С проиграните варианти се прави количествена оценка на възможностите на системата да изчерпва необходимото количество пластова вода и да връща отново в пласта отработената вода, като се отчитат всички лимитиращи природни, технологични и екологични условия.
- **Топлинна задача.** Използват се едномерни топлинни модели, базирани на прогнозираното с хидрогеоложкия 3D модел разпределение на напорите и данните за топлофизичните свойства на пласта. Финалните решения дават дългосрочна прогноза за температурата на изчерпваната пластова вода при отчитане на температурния режим на връщаната в пласта вода.

За съставяне на основния хидрогеоложки 3D модел се използва програма Modflow. Използваната в нейния алгоритъм изчислителна процедура се свежда до числено решаване (в крайните разлики) на диференциалното уравнение, описващо тримерното движение на подземни води в пореста среда (Andersen, 1993; Harbaugh, McDonald 1996, Harbaugh et al., 2000; и др.).

При решаване на топлинната задача се прилага един по-прост методически подход, включващ използването на аналитичното решение на Ловерие за линеен топлинен поток и МЕТЛ. (Гълъбов, Пенчев, 1986; Гълъбов, Стоянов, 2011; и др.). Накратко, получените с хидрогеоложкия модел пиезометрични карти се трансформират като всяка токова лента се трансформира в условна еквивалентна токова лента, имаща същата дължина x и разход $Q_{\text{тл}}$, постоянна плочно осреднена широчина b_0 , средна скорост на филтрация v и среден градиент $I_{\text{тл}}$. След това към всяка токова лента се прилага уравнението на Ловерие,

описващо изменението на температурата θ_i в края на i -тата токова лента.

$$\bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_e - \theta_0} = \operatorname{erfc} \left(\frac{x B_d}{v \sqrt{t - t_R}} \right) \quad (1)$$

където: θ – температура на добиваната вода, θ_e – начална температура на пластовата вода, θ_0 – температура на инжектираната вода, t_R – „транзитно време“ ($t_R = (n_0 x)/v$), B_d – коефициент на топлообмен с водоупорите, n_0 – коефициент на термолпорестост, x – разстояние, t – време.

Изменението на температурата във водочерпателния кладенец $\theta_{\text{кл}}$ се определя по "закона за смесването":

$$\theta = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^v Q_i \theta_i \quad (2)$$

където: Q_i – разход в i -тата лента, θ_i – температура на водата, постъпваща от i -тата лента; v – брой на токовите ленти към кладенеца; Q – дебит на кладенеца.

Изчисленията се правят за всеки водочерпателен кладенец по отделно. За решаване на топлинната задача може да се ползва представената в (Гълъбов, Стоянов, 2011) компютърна програма Тегма-М, в чийто алгоритъм е имплементиран описания по-горе методически подход.

Концептуален модел

При решаване на филтрационната и топлинната задача е използвана следната концепция за хидрогеоложките и технологични условия в района на циркуляционната сондажна система за добив на ГТЕ, изградена на територията на ж.к. "Дружба", гр. София (фиг. 1).



Фиг. 1. Местоположение на циркуляционната сондажна система

Обект на изследване е кватернерният водоносен хоризонт, в който е изградена циркуляционната система. Хоризонтът включва два водоносни пласта: горен и долен. Горният водоносен пласт обхваща чакълесто-песъчливите наслаги, установени в горната част на геоложкия разрез (в интервала от 4-5 до 20 m). Средната му дебелина е около 19 m, а средният коефициент на филтрация – 6-7 m/d. Долният водоносен пласт е формиран в лежащите в дълбочина по-дребнозърнести, сравнително по-заглинени и по-сбити чакъли, пясъци и

песъчливи глини. Общата дебелина на тези материали е 17-18 m. Значителното присъствие на глинеста компонента определят по-слабата водопроницаемост на долния пласт (коэффициентът на филтрация е около 4 m/d). Двата пласта са хидравлично свързани и образуват общ напорен хоризонт. За горен водоупор служи пласт от песъчливи глини с дебелина 4 m. Долният водоупор е изграден от плътни глини е установен на дълбочина около 40 m. Топлофизичните характеристики на кватернерния хоризонт са определени по литературни данни (Череменин, 1972, Гълъбов, Стоянов, 2011; и др.) и в съответствие с типа на съставящите го литоложки разновидности. Прието е, че коефициентите на термoporестост и на топлообмен с водоупорите са съответно $n_0 = 0.35$ и $V_d = 0.014 \text{ d}^{-1}$.

На изток от обекта, на около 1300 m преминава р. Искър. Тя е в пряка връзка с подземните води и до голяма степен контролира естествената структура подземния поток в кватернера. Подземните води следват посоката на речното течение - на север, като средният градиент е около 0.004. На около 250 m на запад от обекта се намира езеро "Дружба", което е остатък от стара кариера за инертни материали. Езерото е генетично свързано с кватернерния хоризонт и е главната причина за добре изразена локална деформация в структурата на подземния поток (фиг. 3). Подхранването на подземните води е от инфилтрация на атмосферни води, от постъпващия от юг подземен поток и от езерото. Инфилтрационното подхранване е в размер на 5% от годишната сума на валежа (693 mm).

Циркулационната система се състои от два черпателни сондажа (BC-1 и BC-2) и пет инжекционни сондажа (IC-1, IC-2, IC-3, IC-4 и IC-5), чието разположение е дадено на фиг.3. Дълбочината на черпателните сондажи е 40 m, а на инжекционните 25 m. Всички сондажи са с диаметър 0.2 m. Използваната в основния хидрогеоложки 3D модел работна хипотеза предполага, че водочерпателните кладенци ще работят с равни дебита (всеки по 5.5 l/s), което ще обезпечи нормалната работа на термopомпенната климатична инсталация. В проиграните варианти на основния модел се разглеждат възможностите за поглъщане на отработената вода от петте инжекционни кладенци при поддържане на постоянни нива в тях. В различните варианти се приема, че нивата в инжекционните сондажи ще се поддържат различни нива под кота "0" (за кота "0" е приета средната за естествения терен в района на сондажите абсолютна кота 547 m).

Работната хипотеза в топлинните модели е съобразена с естествените условия и режима на термopомпенната инсталация. На тази основа се приема, че началната температура на пластовата вода е $\theta_e = 13^\circ\text{C}$, а температурата на връщаната с инжекционните кладенци вода се променя циклично през 6 месеца. През първия цикъл (от май до октомври) температурата на инжектираната вода ще бъде $\theta_{\text{инж}}^I = 24^\circ\text{C}$, а през втория цикъл (от ноември до април) ще е $\theta_{\text{инж}}^{II} = 6^\circ\text{C}$.

Филтрационни моделни изследвания

Композиране на основния хидрогеоложки модел

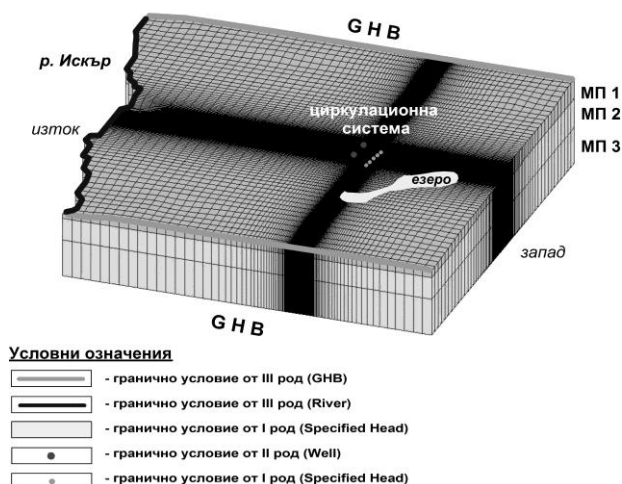
Основните изходни позиции и входни параметри при композирането на основния хидрогеоложки 3D модел са:

- Моделът е съставен с програмния пакет Modflow.

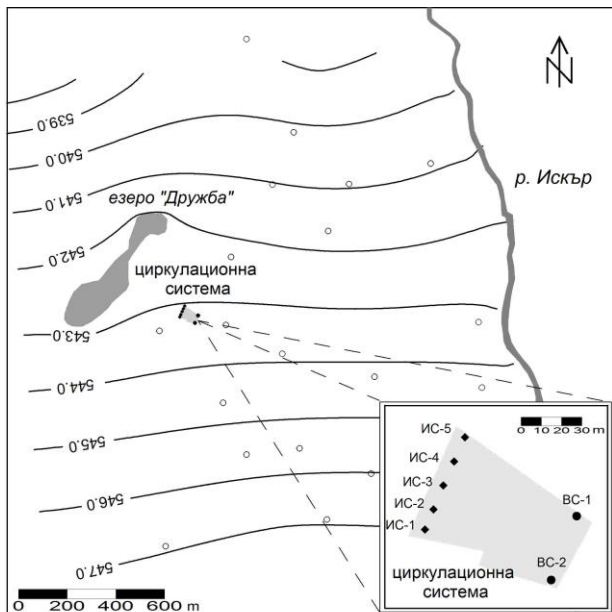
- Общата площ на моделната област е около 3.92 km².
- Пространствената дискретизация е направена чрез неравномерна ортогонална мрежа, която е съгъстена в близост до сондажите (фиг.2). Моделът включва три моделни пласта (МП-1, МП-2 и МП-3), а като приетите за всеки пласт средни дебелини h_{cp} и коефициенти на филтрация k_{cp} са представени в табл. 1.
- Регионалният поток е моделиран чрез симулиране на разход по южната и северната граница по схемата ГНВ. За напорите по границите са приети стойности, при които средният градиент е 0.004. Река Искър е симулирана като тримерен обект със съответните геометрия на руслото и хидравлични характеристики на речното течение. Включена е с гранично условие от III род (River). Езерото е зададено с гранично условие от I род (Specified Head) на кота 542.5. Инфилтрационното подхранване е симулирано с гранично условие (Recharge) и скорост на инфилтрация $W = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/d}$.
- Черпателните и инжекционните сондажи са зададени като тримерни обекти със съответните конструктивни особености. Действие на водочерпателните сондажи се моделира с гранично условие от II род със зададен дебит (Well), а на инжекционните сондажи – с гранично условие от I род със зададено ниво (Specified Head). В основния модел сондажите не работят. Те се активират при симулационното проиграване на различни варианти за експлоатация на циркулационната система.
- Съседните кладенци са зададени като наблюдателни точки (Observation Point), в които се следи изменението на напора под действието на циркулационната система.
- При калибриране на основния хидрогеоложки модел са използвани: (1) естествените нива в сондажите от циркулационната система; (2) нивата в близко-разположените кладенци; (3) резултатите от проведения комбиниран тест (черпене/наливане) със циркулационната сондажна система; (4) водните стоежи в р. Искър.

Таблица 1. Характеристики на моделните пластове

Хидрогеоложка единица	Моделен пласт	h_{cp} , m	k , m/d
Горен водоупор	МП-1	4	0.01
Горен водоносен пласт	МП-2	15	6.0
Долен водоносен пласт	МП-3	21	4.0



Фиг. 2. Пространствена дискретизация. Гранични условия



Условни означения

- BC-1 - водочерпателен сондаж №
- - съществуващ кладенец
- ◆ IC-3 - инжекционен сондаж №
- 548.0 - гидроизохипси

Фиг. 3. Основен хидрогеоложки 3D модел. Естествена структура на филтрационно поле

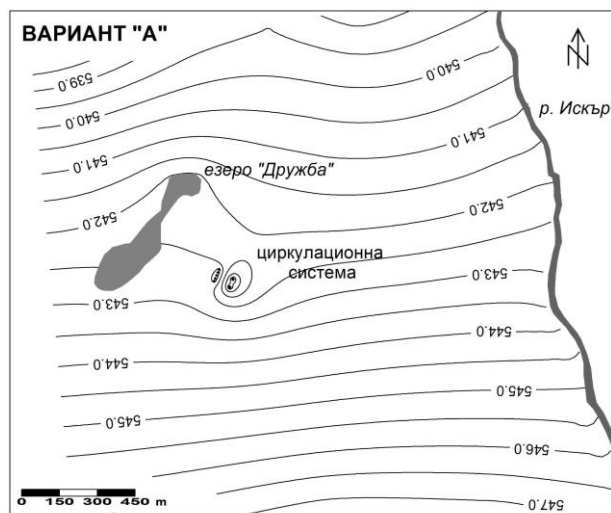
Детерминираната с така композиция модел структура на естественото (ненарушено) филтрационно поле е илюстрирана на фиг. 3. Полученото добро съответствие между фактическата (измерената) и моделираната пиезометрия в разглежданата част от кватернерния водоносен хоризонт свидетелства за устойчивостта и достатъчната надеждност на основния модел.

Вариантни решения

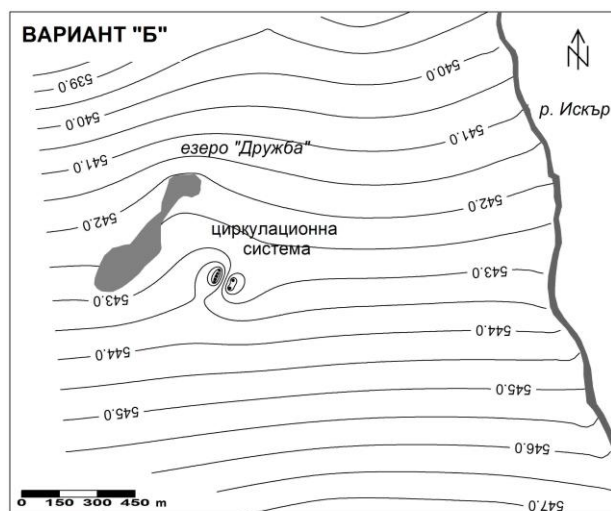
За оценка на възможностите за връщане на отработената вода в пласта без това да предизвика оводняване на подземните етажи в съседните сгради, с основния модел са проиграни голям брой варианти, в които се варира дълбочината на поддържащото ниво в инжекционните сондажи спрямо кота "0" при условие, че сумарния дебит на водочерпателните сондажи е 11 l/s.

В табл. 2 са представени решенията от двата крайни варианта (А и Б), в които се приема възможно най-ниско и най-високо ниво в инжекционните сондажи. Прогнозираните за всеки от двата варианта промени в структура на филтрационното поле са илюстрирани на фиг. 4 и фиг. 5, а съставените хидродинамични мрежи са представени на фиг. 6 и фиг. 7. Получените с другите варианти прогнозни решения са в рамките между тези два гранични случая.

Нивото в инжекционните кладенци при *Вариант А*, което е на 3 m под кота "0", се определя като възможно най-ниско тъй като според моделните решения при нива над тази стойност фундаментите и подземните етажи в съседните сгради ще се наводнят. Същевременно, зададеното при *Вариант Б* ниво на 0.5 m под кота "0", се определя като възможно най-ниско тъй като в този случай може да се осъществи пълно връщане на отработената вода в пласта.



Фиг. 4. Нарушена структура на филтрационно поле. Вариант А



Фиг. 5. Нарушена структура на филтрационно поле. Вариант Б

Таблица 2. Прогнозни минимални и максимални нива и дебиту

Сондаж №	Кота СВН, m	Вариант А		Вариант Б	
		Кота ДВН, m	Дебит Q _c , l/s	Кота ДВН, m	Дебит Q _c , l/s
BC-1	543.18	537.65	5.50	538.80	5.50
BC-2	543.30	537.91	5.50	539.03	5.50
		ΣQ _ч , l/s		ΣQ _ч , l/s	
		11.00		11.00	
ИС-1	543.18	544.00	1.09	546.50	2.24
ИС-2	543.15	544.00	1.03	546.50	2.07
ИС-3	543.11	544.00	1.03	546.50	2.03
ИС-4	543.07	544.00	1.08	546.50	2.14
ИС-5	543.03	544.00	1.25	546.50	2.52
		ΣQ _{инж} , l/s		ΣQ _{инж} , l/s	
		5.48		11.00	

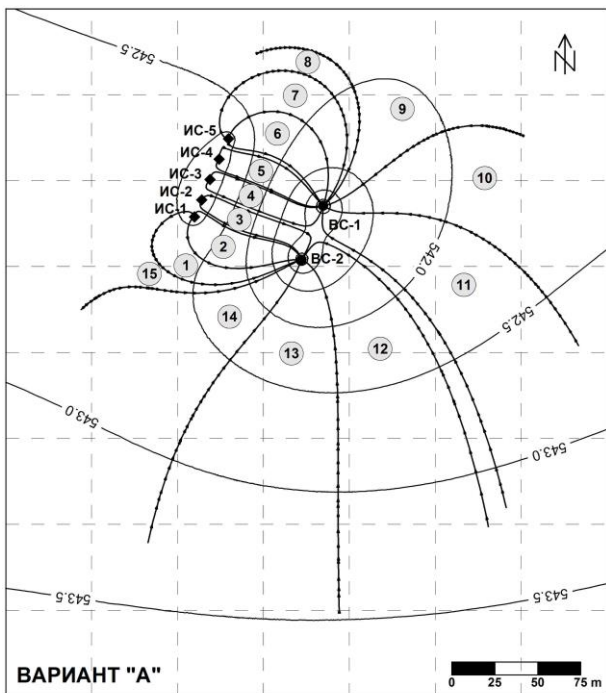
Забележка: СВН – статично водно ниво, ДВН – динамично водно ниво, Q_c – дебит на сондажа; ΣQ_ч – сумарен дебит на черпената от системата вода, ΣQ_{инж} – сумарен дебит на инжектираната вода в пласта

Термодинамични моделни изследвания

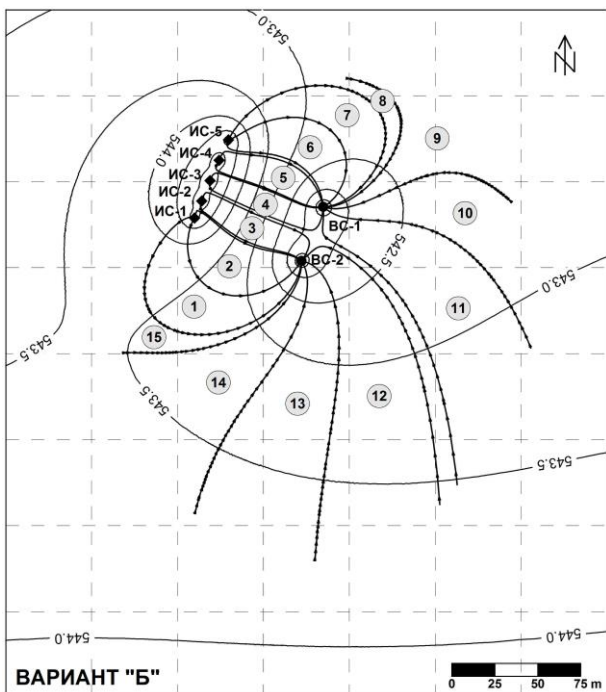
Хидродинамични параметри на топлинната задача

Първа стъпка при решаване на топлинната задача е хидродинамичното параметризиране на системата. Това

включва детерминиране на структурата на нарушеното филтрационно поле, респ. диференциране на токовите ленти и определянето на градиентите, скоростите и разходите към водочерпателните сондажи.



Фиг. 6. Хидродинамична мрежа. Вариант А



Условни означения

- - водочерпателен сондаж (BC)
- ◆ - инжекционен сондаж (ИС)
- ⊙ - номер на токова лента
- 548.0 — - екипотенциални линии
- - токови линии

Фиг. 7. Хидродинамична мрежа. Вариант Б

С разработените по-горе вариантни модели са изчертани хидродинамични мрежи, илюстриращи структурата на нарушеното филтрационно поле. Определените на фиг. 6 и 7 токови ленти са трансформирани в съответстващите им

еквивалентни токови ленти. В табл.3 е дадена кратка информация за някои геометрични и хидродинамични характеристики на токовите ленти, обезпечаващи дебита на двата водочерпателни кладенеца. Посочените стойности за използвани като входни данни при решаване на топлинната задача.

Таблица 3. Хидродинамични характеристики на токовите ленти

Вариант А						
BC №	ТЛ №	F_i, m^2	x_i, m	$l_i, -$	$v_i, m/d$	$Q_i, m^3/d$
BC-1	4	813	71.2	0.039	0.233	50.57
	5	864	67.4	0.042	0.246	59.96
	6	1500	82.0	0.034	0.202	70.33
	7	2088	132.0	0.021	0.126	37.78
	8	1264	133.6	0.015	0.091	16.35
	9	4740	104.2	0.018	0.110	94.72
	10	6776	144.2	0.014	0.084	75.07
BC-2	11	9784	191.0	0.012	0.072	70.30
	1	1172	108.0	0.027	0.159	32.79
	2	1176	72.0	0.040	0.239	74.03
	3	752	72.2	0.040	0.238	47.08
	12	12404	208.4	0.012	0.074	82.79
	13	14072	187.6	0.014	0.083	117.19
	14	9196	161.4	0.015	0.089	96.28
Вариант Б						
BC №	ТЛ №	F_i, m^2	x_i, m	$l_i, -$	$v_i, m/d$	$Q_i, m^3/d$
BC-1	4	880	73.0	0.051	0.306	70.01
	5	980	68.0	0.055	0.328	89.86
	6	1660	90.4	0.041	0.247	86.12
	7	2264	144.0	0.026	0.155	46.29
	8	664	113.0	0.017	0.102	11.34
	9	3312	105.6	0.018	0.106	63.13
	10	3500	128.0	0.016	0.095	49.40
BC-2	11	7664	181.0	0.012	0.073	58.00
	1	2532	139.6	0.027	0.162	55.76
	2	1804	81.2	0.046	0.278	117.43
	3	1000	70.6	0.053	0.320	86.11
	12	8688	191.0	0.012	0.073	63.49
	13	7468	171.8	0.014	0.083	68.47
	14	5636	149.0	0.015	0.092	65.78

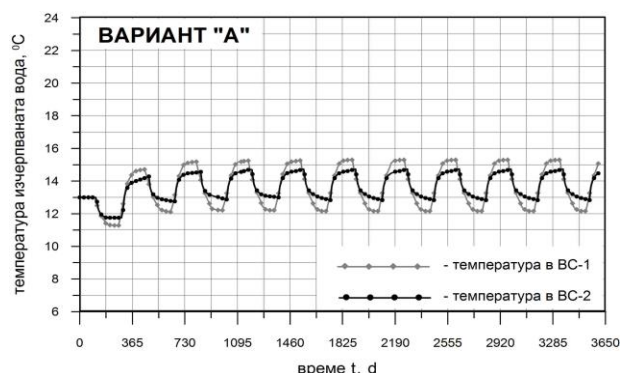
Забележка: Характеристики на i-тата токова лента: F_i – площ, x_i – дължина, l_i – градиент; v_i – скорост на филтрация, Q_i – разход

Прогнозиране на температурата на черпената с водочерпателните кладенци пластова вода

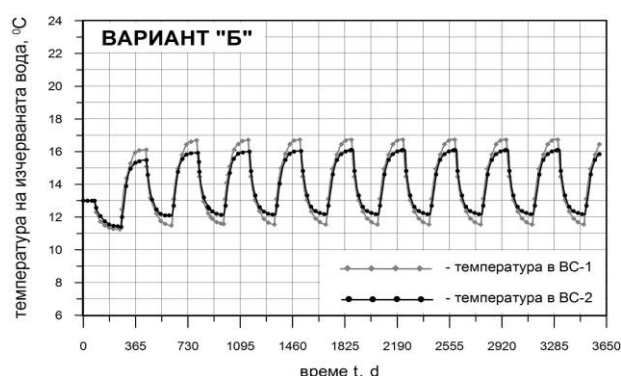
Прогнозата е направена посредством програма TERMA-M. Като входни данни са използвани определените геометричните и хидродинамични характеристики на токовите ленти към водочерпателните кладенци (табл. 3). При термодинамичните изчисления в двата варианта са направени и следните допускания:

- **топлофизични характеристики на водоносния хоризонт**
 - начална температура на пластовата вода $\theta_e = 13^\circ C$;
 - коефициент на термoporестост $n_\theta = 0.35$;
 - коефициент на топлообмен с водоупорите $B_d = 0.014 d^{-1}$.
- **топлинен режим на инжекционните сондажи**
 - температурата на връщаната в пласта вода се променя циклично през 6 месеца в продължение на целия изчислителен (прогнозен) период от 10 години;
 - през първия цикъл (от май до октомври), температурата на инжектираната вода ще бъде $\theta_{инж}^I = 24^\circ C$;
 - през втория цикъл (от ноември до април), връщаната в пласта отработена вода ще с температура $\theta_{инж}^{II} = 6^\circ C$.

Резултатите от направените при тези условия прогнози за температурата на черпената вода от ВС-1 и ВС-2 като функция на времето $\theta = f(t)$ са представени в графичен вид на фигури 8 (за Вариант А) и 9 (за Вариант Б).



Фиг. 8. Прогноза за температурата на черпената вода от ВС-1 и ВС-2 за период от 10 години. Вариант А



Фиг. 9. Прогноза за температурата на черпената вода от ВС-1 и ВС-2 за период от 10 години. Вариант Б

Анализ на резултатите. Изводи

Въз основа на резултатите от моделните изследвания при условията на двата гранични варианта могат да се направят следните по-важни обобщения и изводи:

• Вариант А

- Инжекционните сондажи поглъщат общо 5.5 l/s, от които около 80% постъпват обратно в черпателните сондажи и формират приблизително 39% от общия черпен дебит. Другите 20% от инжектираната в пласта вода преминава с естествения подземен поток на С3. В черпателните сондажи от ЮИ постъпват около 6.7 l/s.
- Температурата на добиваната вода варира в съответствие със сезонната работа на системата, като измененията след втората година са с периодична годишна повторяемост и са в интервала между 12.1°C и 15.3°C (в ВС-1), респ. между 12.8°C и 14.8°C (в ВС-2) – виж фиг. 8. През първата година от експлоатацията температурите са малко по-ниски – в интервала от 11.2°C до 14.5°C (в ВС-1) и от 11.8°C – 14.0°C (в ВС-2).

• Вариант Б

- От поглъщаните 11 l/s около 58 % (6.38 l/s) се връщат в черпателните сондажи, а останалите 42 % (4.62 l/s) отиват на С3 с общия подземен поток. Последното количество се компенсира в черпателните сондажи от водопритока, постъпващ от ЮИ.

- Температурата на добиваната вода варира между 11.5°C и 16.8°C (в ВС-1) и между 12°C и 16°C (в ВС-2), като промените след втората година, както в предишния случай, са с периодична годишна повторяемост (фиг. 9). През първата година от експлоатацията температурите и в този случай са малко по-ниски – в интервала от 11.2°C до 16.0°C (в ВС-1) и от 11.4°C до 15.4°C (в ВС-2).
- При този вариант може да се реинжектира цялото водно количество при нива във вече изградените поглъщащи сондажи на не повече от 0.5 m под терена. Тази схема е видимо неприемлива, тъй като интензивното покачване на подземните води ще засегне фундаментите и подземията на съседните сгради.

Комплексният анализ на резултатите от моделните изследвания дава основание да се направи заключението, че оптималният експлоатационен режим на изградената циркулационна система съответства на възприетите във Вариант А условия, като се направи едно много важно допълнение. То е свързано с факта, че само 50% от отработената вода е възможно да бъде върната в пласта без това да доведе до оводняване на съседните сгради. Останалите 50% са "излишни" и трябва да се отвеждат. Подходящ водоприемник в случая е езеро "Дружба",стоящо на около 250 m от обекта. То е част от кватернерния водоносен хоризонт, в който ще работи сондажната система, така че водният баланс на този хоризонт няма да бъде нарушен. Същевременно, отвеждането на "излишната" вода в езерото не може да предизвика екологични вреди, тъй като (1) тя е със същото качество като това на водата от езерото (това е вода от един и същ водоносен хоризонт); (2) Температурата на отвежданата вода – около 6°C (зимата) и 22-24°C (лято) е напълно съизмерима с обичайните естествени температури в езерото.

Друг възможен вариант сондажната система да работи с балансиран дебит без да оводнява съседните сгради, е изграждането на още 5-6 инжекционни сондажа (при ниво в тях на 3 m под терена). Този вариант не е разглеждан в рамките на това изследване.

Литература

- Гълъбов, М. М., П. П. Пенчев. 1986. *Решаване на приложни хидрогеоложки задачи с помощта на ЕИМ*. С., Техника, 374 с.
- Гълъбов, М. М., Н. Т. Стоянов. 2011. *Термохидродинамика на геотермалните находища*. С., Изд. "В. Недков", 202 с.
- Andersen, P. F. 1993. A manual of instructional problems for the Modflow model. – In: *Center for Subsurface Modeling Support, EPA 600/R-93/010*.
- Harbaugh, A. W., M. G. McDonald. 1996. Documentation for Modflow-96, an update to the USGS modular finite-difference ground-water flow model. – *USGS Open-File Report 96-486*, 56 p.
- Harbaugh, A., E. Banta, M. Hill, M. McDonald. 2000. Modflow-2000, The USGS modular groundwater model – user guide to modularization concepts and the groundwater flow process. – *Open-File Report 00-92, USGS*, 130 p.