

ISSN 1857-0046

BULETINUL

**INSTITUTULUI DE GEOLOGIE
ȘI SEISMOLOGIE AL ACADEMIEI DE
ȘTIINȚE A MOLDOVEI**

JOURNAL

**OF THE INSTITUTE OF GEOLOGY AND
SEISMOLOGY OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF
MOLDOVA**

**APARE DE DOUĂ ORI PE AN
TWO ISSUES YEARLY**

2017

No. 1

Colegiul de redacție "Buletinul Institutului de Geologie și Seismologie al Academiei de Științe a Moldovei":

1. V. Gh. Alcaz, *doctor habilitat în științe fizico-matematice, redactor – șef*
2. I. N. Nicoara, *doctor în științe geologico-mineralogice, redactor responsabil*
3. O. P. Bogdevici, *doctor în științe geologo-mineralogice*
4. V. G. Secrieru, *doctor în științe fizico-matematice*
5. A.V. Kendzera, *doctor în științe fizico-matematice*
6. V. Codrea, *profesor, doctor în geologie*
7. Gh. Mărmureanu, *profesor, doctor în geofizică*
8. O. N. Melniciuc, *doctor habilitat în științe geografice*
9. Gh. N. Sîrodoev, *doctor în științe geologo-mineralogice*
10. E. S. Isicico, *colaborator științific, geofizician*
11. V. N. Ghinsari, *doctor în științe fizico-matematice*
12. N. A. Arnaut, *doctor în științe geografice*

“Journal of the Institute of Geology and Seismology of Moldavian Academy of Sciences” editorial board:

1. V. Gh. Alcaz, *doctor habilitatus in Physics and Mathematics, editor in chief*
2. I. N. Nicoara, *doctor in Geology and Mineralogy, executive editor*
3. O. P. Bogdevici, *doctor in Geology and Mineralogy*
4. V. G. Secrieru, *doctor in Physics and Mathematics*
5. A.V. Kendzera, *doctor in Physics and Mathematics*
6. V. Codrea, *professor, doctor in Geology*
7. Gh. Mărmureanu, *professor, doctor in Geophysics*
8. O. N. Melniciuc, *doctor habilitatus in Geography*
9. Gh. N. Sîrodoev, *doctor in Geology and Mineralogy*
10. E. S. Isicico, *researcher, geophysicist*
11. V. N. Ghinsari, *doctor in Physics and Mathematics*
12. N. A. Arnaut, *doctor in Geography*

Toate articolele sunt recenzate.

Toate drepturile sunt rezervate redacției și autorilor.

Redactor tehnic: O. P. Cadociniov.

All articles in the journal are subject to review.

Copyright exclusive to redaction and authors.

Technical editor: O.P. Cadociniov

Adresa redacției: str.Academiei 3, MD-2028 Chisinau, Republica Moldova

Editorial address: 3, Academiei Str., MD-2028 Chisinau, Republic of Moldova

Revista publică rezultate ale cercetărilor fundamentale și aplicative în domeniul științelor terestre.

The journal is focused on Earth Science fundamental and applicative researches results.

Web: <http://igs.asm.md/node/15>

Preț de abonament - 70 lei

Subscription fee – 70 MDL

Editură - "ELAN POLIGRAF" S.R.L., Chișinău 2017

Publisher - "ELAN POLIGRAF" S.R.L. Chisinau 2017

© Institutul de Geologie și Seismologie al AȘM, 2017

© Institute of Geology and Seismology of ASM, 2017

SUMAR

<i>Карпенко В.М., Стародуб Ю.П.</i> Энергетический метод анализа теплообмена в глубокой скважине	5
<i>Павлов П.П.</i> Анализ структуры и полноты базы макросейсмических данных г. Кишинёва с помощью метода главных компонент	19
<i>Степаненко Н.Я., Карданец В.Ю.</i> Карпатские землетрясения за период с 1896 по 1908 гг. (макросейсмический каталог)	26
<i>Степаненко Н.Я., Карданец В.Ю.</i> Особенности проявления землетрясений в районе города Галац	44
<i>Илиеш И.И., Кожокару Н.А., Симонова Н.А.</i> Карпатское землетрясение 23 сентября 2016 г.	54
<i>Покатилов В.П.</i> Об унификации валидных (действительных) стратиграфических подразделений неогена Днестровско-Прутского междуречья.....	63
<i>Codreanu I.</i> Utilizarea modelelor matematice în caracterizarea morfometriei bazinelor râurilor Soloneț și Cogîlnic	71
<i>Полканов В.Н., Сыродоев Г.Н., Богдевич О.П., Полканова А.В.</i> О роли и содержании инженерно-геологического обоснования при проектировании дорог на оползнеопасной территории	79
<i>Sîrodoev Gh., Corobov R., Trombițki I., Cazac V., Canțîr A.</i> Evaluarea resurselor de apă în bazinele hidrografice ale râurilor mici în contextul schimbărilor de mediu (caz de studiu r. Bălțața)	90
<i>Botnaru V.</i> Sistemul Carstic „Emil Racoviță” – monument geologic de importanță europeană, protejat de stat?.....	99
<i>Арнаут Н.А.</i> Эколого-гидрологические основы восстановления естественного режима малых рек Молдовы.....	108

CONTENTS

<i>Karpenko V.M. , Starodub Yu.P.</i> Energy method for analyzing the process of stationary heat exchange in the deep well	5
<i>Pavlov P.P.</i> Analysis of the macroseismic database structure by the principal component method	19
<i>Stepanenko N.Ya., Kardanets V.Yu.</i> Carpathian earthquakes for the period from 1896 to 1908 (macroseismic catalog)	26
<i>Stepanenko N.Ya., Kardanets V.Yu.</i> Features of the manifestation of earthquakes in the area of Galati city	44
<i>Ilies I.I., Cojocaru N.A., Simonova N.,A.</i> Carpathian earthquake of September 23, 2016.....	54
<i>Pocatilov V.P.</i> On the unification of valid (real) Neogene stratigraphic subdivisions of the Dniester-Prut interfluves.....	63
<i>Codreanu I.</i> Utilisation of mathematical models for characterization of the morphometry of Soloneț and Cogalnic rivers	71
<i>Polkanov V.N., Syrodoev G.N., Bogdevich O.P., Polkanova A.V.</i> The role and content of engineering-geological justification for the design of roads on a landslide area	79
<i>Syrodoev Gh., Corobov R., Trombitki I., Cazac V., Cantir A.</i> Evaluation of water resources in hydrographic basins of small rivers in the context of environmental changes (Baltata river case study).....	90
<i>Botmaru V.</i> The Carstic Emil Racoviță System - a state-protected European geological monument?	99
<i>Arnaut N.A.</i> Ecological and hydrological basics for the restoration of the natural regime of the small rivers of Moldova	108

УДК 622.02

Карпенко В.М.¹, Стародуб Ю.П.²

Энергетический метод анализа теплообмена в глубокой скважине

Abstract

On the basis of experimental data, the geophysical energy method for analyzing the process of stationary heat exchange between the geological environment and the deep well space in which the drilling mud circulates during the washing of the well is developed. The method is based on the Stefan-Boltzmann radioactive heat transfer law according to the "hot" Earth model.

Keywords: energy method, heat, deep well.

Rezumat

În baza datelor experimentale, a fost elaborată metoda energetică geofizică pentru analiza procesului schimbului staționar de căldură între mediul geologic și spațiul de adâncime a sondei în care circulă nămolul de foraj în timpul spălării sondei. Metoda se bazează pe legea de transfer a căldurii radioactive Stefan-Boltzmann conform modelului Pământului "fierbinte".

Cuvinte cheie: metodă energetică, schimb de căldură, sondă adâncă.

Резюме

На основании экспериментальных данных разработан геофизический энергетический метод анализа процесса стационарного теплообмена между геологической средой и пространством глубокой скважины, в которой циркулирует буровой раствор при промывке скважины. Метод базируется на законе лучевого теплообмена Стефана-Больцмана согласно модели «горячей» Земли.

Ключевые слова: энергетический метод, теплообмен, глубокая скважина.

Введение

Бурение глубоких скважин всегда сопровождается нагреванием геологической средой (ГС) бурового раствора (б/р). Нагрев достигает таких значений температуры, при которых физико-химическая система б/р теряет свои технологические свойства. Это особенно опасно при простаивании скважин и важно при промывке и их бурении с недостаточной производительностью буровых насосов.

Контроль температуры на забое при проводке глубоких нефтяных и газовых скважин выполняется беспроводными датчиками температуры и давления, которые крепятся в составе комплекта низа бурильной колонны.

¹ Национальная акционерная компания «Нефтегаз Украины» 01601 Киев, ул. Богдана Хмельницького б., тел.+380663814781, ел. почта intexnaftogaz@ukr.net

² Львовський державний університет безпеки життєдіяльності Україна 79000 Львів ул.Клепарівська 35,тел.+380672663182.

Постановка задачи исследования

Необходимо решить задачу длительного контроля температуры на забое глубокой скважины при изменении производительности циркуляционного насоса в геотермальных «зондах» (Isolated single well for an electric geothermal station – ISW-EGS) и использовать термоизолированные трубы эксплуатационной колонны для контроля температуры на забое скважины. Нерешённость проблемы связана с отсутствием достаточных экспериментальных данных, которые отображают опыт эксплуатации. В работе [1] упомянуто 450 существующих в мире станций типа ISW-EGS.

Основным подходом исследования теплообмена в глубоких скважинах остаётся метод, описанный в работах [2-11], построенный на основе закона теплопроводности Фурье.

В работах авторов на основании физического представления динамической теории кристаллических решёток [12] рассмотрены состояние и перспективы использования глубоких скважин для обеспечения потребителей тепловой и электрической энергией [14,15].

Научная и практическая значимость

Первой научной проблемой существующего метода при практическом использовании является то, что данный метод предусматривает контроль и неравенство входной $T_{вх}$ и выходной $T_{вых}$ температуры (энергетического носителя) э/н на устье скважины, прогноз забойной температуры э/н при заданном априори параметре D_g - диаметр около скважинного пространства, который является основным в существующем методе, поскольку плотность теплового потока в геологической среде (ГС) определяется равенством $q_g = -\lambda_g \cdot grad(T_g)$ [Вт/м²], где λ_g - теплопроводность ГС, $grad(T_g)$ - температурный градиент в ГС, а на внешней

поверхности обсадной колонны диаметром D_c - $q_g = \frac{2\pi\lambda}{D_c \ln\left(\frac{D_g}{D_c}\right)} (T_g - T_{e/n})$, [Вт/м²],

где $(T_g - T_{e/n})$ - разность температур между ГС и э/н. Так, при $D_g \rightarrow \infty$ следует $q_g \rightarrow 0$, а при $D_g \rightarrow D_c$, $q_g \rightarrow \infty$.

Второй научной проблемой существующего подхода является неопределённость связи между плотностью теплового потока в ГС, который определяется уравнением Фурье $q_g = \lambda_g \cdot grad[T_g(L)]$, до 0,15 Вт/м², и естественным тепловым полем Земли, плотность теплового потока которого определяется спектром ИК-волн (инфракрасных-волн) законом Стефана-Больцмана на уровне 340 Вт/м² для стабильной температуры 10⁰С в ГС.

Третьей научной проблемой при использовании существующего метода является условие: $T_{вх} = T_{вых}$, которое не имеет места на практике при $T_{вх} \neq T_{вых}$.

Предложенный метод решения проблемы основывается на физическом представлении о модели «горячей» Земли, согласно которой естественное тепловое поле является следствием гравитационного сжатия Земли, как и температура ГС с глубиной. В результате всестороннего сжатия атомы и молекулы ГС уменьшают амплитуды своих колебаний, повышая их частоту, и, следовательно, повышают свою температуру Дебая, поскольку последняя определяется частотой колебаний атомов и молекул, определяющих скорость распространения акустических волн в ГС [12].

Зависимость объёмного модуля упругости от гравитационной энергии была впервые доказана в работе [13]. Зависимость температуры веществ от объёмного сжатия известна со времён Паскаля.

Цель статьи: Разработать энергетический метод оценки температуры э/н на забое глубокой изолированной одинокой скважины с целью обоснования проектирования энергетических параметров электрических геотермальных станций (ISW-EGS).

Энергетический метод анализа процесса теплообмена в глубоких скважинах основывается на следующих физических принципах:

- тепловая энергия ИК-волн, которые излучают атомы и молекулы ГС, увеличивается с глубиной, постоянна на заданной глубине (модель «горячей» Земли);
- температура обсадной колонны (ОК) равна температуре ГС по глубине;
- температура э/н и эксплуатационной колонны (ЭК) в скважине равны;
- рассматривается только лучистый теплообмен в скважине;
- скорость распространения энергии ИК-волн равна скорости акустических волн в ГС;
- в стационарном режиме кондуктивный теплообмен в ГС по горизонтальной плоскости отсутствует в силу одинаковых гравитационных энергетических уровней и температур на заданной глубине по всей глубине скважины.

Процесс теплообмена в системе «геологическая среда-скважина-земная поверхность» («ГС-С-П») рассматривается как нагревание э/н в природной постоянной мощности «микроволновой печи», не зависящей от технологического режима циркуляции. Процесс описывается энергетическим уравнением

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{\downarrow}(L) + Q_{\uparrow}(L) + Q_{ek}(L) + \Delta Q_{\uparrow\downarrow}(L) = \\ = \int_0^{t_{\downarrow}} N_{\downarrow}(L) dt(L) + \int_0^{t_{\uparrow}} N_{\uparrow}(L) dt(L) + \int_0^{t_n} N_{\downarrow\uparrow}(L) dt(L) \end{aligned} \right., \text{ Дж}, \quad (1)$$

где $Q_{\downarrow}(L) = m_{\downarrow}(L)c\Delta T_{\downarrow}(L)$, $Q_{\uparrow}(L) = m_{\uparrow}(L)c\Delta T_{\uparrow}(L)$, $Q_{ek}(L) = m_{ek}(L)c_{ek}\Delta T_{ek}(L)$,

L - глубина скважины. $Q_{\uparrow\downarrow}(L) = c\Delta T_{\uparrow\downarrow}(L=0)\frac{dm}{dt}t_n(L)$ - накопленная тепловая энергия э/н в пространствах ОК-ЭК (движение вниз) и ЭК (движение), материалом ЭК, э/н на устье (земной поверхности), соответственно, за время циркуляции э/н в скважине, Дж. При этом для повышения точности метода следует учитывать массу обсадной колонны, приёмных емкостей, массу э/н в приёмных емкостях и отбор тепла на поверхности, которые увеличивают мощность нагрева за ограниченное время при заданных экспериментальных температурах. Здесь рассматривается

анализ теплообмена для одинаковых температур э/н на устье, что позволяет определить чистые потери тепла в ГС. $m_{\downarrow}(L), m_{\uparrow}(L), m_{ek}(L)$ - общая масса э/н в скважине в пространствах ОК-ЭК при движении носителя соответственно вниз и вверх, эксплуатационной колонны, соответственно, кг; c, c_{ek} - удельная теплоёмкость э/н и ЭК, соответственно, Дж/(кг·°C); $N_{\downarrow}(L) = \int_0^{S_{ok}} q_{\downarrow}(L) dS(L)$ - общая мощность передачи тепловой энергии от ГС к э/н пространства ОК-ЭК, Вт;

$N_{\uparrow}(L) = \int_0^{S_{ok}} q_{\uparrow}(L) dS(L)$ - общая мощность передачи тепловой энергии от ГС в э/н пространства ЭК, Вт;

$N_{\downarrow\uparrow}(L) = \int_0^{S_{ok}} q_{\downarrow\uparrow}(L) dS(L)$ - общая мощность передачи тепловой энергии между э/н пространства ОК-ЭК и э/н пространства ЭК, Вт;

$\int_0^{t_{\downarrow}} \left[\int_0^{S_{ok}} q_{\downarrow}(L) dS(L) \right] dt(L) = \frac{\pi D_{ok}}{V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow} \int_0^{t_{\downarrow}} \left[\int_0^{L_m} \left\{ [T_0 + T_g(L)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow}(L)]^4 \right\} L dL \right] dL$ - общая тепловая энергия, переданная ГС в пространство ОК-ЭК за время t_{\downarrow} движения э/н от устья к забю, Дж;

$\int_0^{t_{\uparrow}} \left[\int_0^{S_{ok}} q_{\uparrow}(L) dS(L) \right] dt(L) = \frac{\pi D_{ek}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{t_{\uparrow}} \left[\int_0^{L_m} \left\{ \varphi_e [T_g(L)]^4 - (\varphi_e - 1) [T_{\downarrow}(L)]^4 - [T_{\uparrow}(L)]^4 \right\} L dL \right] dL$ - общая тепловая энергия, переданная ГС в пространство ЭК за время t_{\uparrow} движения э/н от забоя к устью, Дж;

$\int_0^{t_n} \left[\int_0^{S_{ok}} q_{\downarrow\uparrow}(L) dS(L) \right] dt(L) = \pi D_{ek} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\downarrow\uparrow} \int_0^{t_n} \left[\int_0^{S_{ok}} \left\{ [T_0 + T_{\uparrow}(L)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow}(L)]^4 \right\} L dL \right] dL$ - общая тепловая энергия обмена между энергоносителями сквозь стенку ЭК за время $t_n = t_{\downarrow} + t_{\uparrow}$ нахождения э/н в скважине, Дж;

$q_{\downarrow}(L), q_{\uparrow}(L), q_{\downarrow\uparrow}(L)$ - плотности тепловых потоков от ГС к э/н в пространстве ОК-ЭК и ЭК, между э/н пространства ОК-ЭК и э/н пространства ЭК, Вт/м²;

dm/dt - продуктивность насосов, кг/с;

$q_{\downarrow}(L) = \sigma \varepsilon_{\downarrow} \left[(T_0 + T_g(L))^4 - (T_0 + T_{\downarrow}(L))^4 \right]$ - плотность теплового потока от ГС к э/н пространства ОК-ЭК, Вт/м²; здесь $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана; ε_{\uparrow} - общий коэффициент черноты системы ГС-ОК-ЭК (смотри ниже);

$q_{\uparrow}(L) = \sigma \varepsilon_{\uparrow} \left\{ \varphi_e [T_g(L)]^4 - (\varphi_e - 1) [T_{\downarrow}(L)]^4 - [T_{\uparrow}(L)]^4 \right\}$, $\varphi_e = \frac{S_{ok}}{S_{ek}}$ - плотность

теплового потока от ГС через экран э/н пространства ОК-ЭК к э/н пространства ЭК через стенки ЭК, Вт/м²;

$T_{\downarrow}(L) = T_{\downarrow 0} + L \cdot grad(T_{\downarrow})$ - температура э/н в скважине, двигающегося от устья к забюю, °C;

$T_{\uparrow}(L) = T_{\uparrow m} - L \cdot grad(T_{\uparrow})$ - температура э/н в скважине, двигающегося от забюя к устью, °C;

$\Delta T_{\downarrow}(L) = T_{\downarrow}(L) - T_{\downarrow 0}$ - температура нагревания э/н в скважине, двигающегося от устья к забюю, °C;

$\Delta T_{\uparrow}(L) = T_{\uparrow}(L) - T_{\uparrow 0}$ - температура охлаждения э/н в скважине, двигающегося от забюя к устью, °C;

$\Delta T_{\uparrow\downarrow}(L) = T_{\uparrow}(L) - T_{\downarrow}(L)$ - разность температур э/н, двигающихся вверх-вниз в скважине, °C;

$\Delta T_{\uparrow\downarrow}(L=0) = T_{\uparrow 0}(L) - T_{\downarrow 0}(L)$ - разность температур э/н на устье между входом и выходом, °C;

$\Delta T_{\uparrow\downarrow m}(L=L_m) = T_{\uparrow m}(L) - T_{\downarrow m}(L) = 0$ - разность температур э/н на забюе, °C;

$m_{ek}(L) = \rho_{ek} w_{ek}(L)$ - масса ЭК, кг, $w_{ek}(L) = \frac{\pi}{4}(D_{ek}^2 - d_{ek}^2)$ - объём ЭК, м³;

ρ_{ek} - плотность материала ЭК, кг/м³;

$t_n = t_{\downarrow} + t_{\uparrow}$ - общее время нагревания э/н при производительности насоса $\frac{dm}{dt}$, который двигается вниз в пространстве ОК-ЭК от устья у забюю за время t_{\downarrow} и вверх от забюя до устья в пространстве ЭК за время t_{\uparrow} , с, где $t_{\downarrow} = f_{\downarrow}\left(\frac{dm}{dt}\right)$ и $t_{\uparrow} = f_{\uparrow}\left(\frac{dm}{dt}\right)$,

$t_{\downarrow} = \frac{L}{V_{\downarrow}}, V_{\downarrow} = \frac{dm/dt}{\rho s_{\downarrow}}, t_{\uparrow} = \frac{L}{V_{\uparrow}}, V_{\uparrow} = \frac{dm/dt}{\rho s_{\uparrow}}, s_{\uparrow} = \frac{\pi}{4}d_{ek}^2, s_{\downarrow} = \frac{\pi}{4}(d_{ok}^2 - D_{ek}^2), D_{ok}, d_{ok}, D_{ek}, d_{ek}$

- наружный и внутренний диаметры ОК, ЭК, соответственно, м, ρ - плотность э/н, кг/м³;

$W_{ok} = 0,25\pi(d_{ok}^2 - D_{ek}^2)L, W_{ek} = 0,25\pi d_{ek}^2 L$ - объёмы пространств ОК-ЭК и ЭК, зависящие от глубины скважины L , соответственно, м³;

$m_{\downarrow}(L) = \rho W_{ok}(L)$ - масса э/н в пространстве ОК-ЭК, кг;

$m_{\uparrow}(L) = \rho W_{ek}(L)$ - масса э/н в пространстве ЭК, кг;

В работе [16] получены значения для общего коэффициент черноты

$\varepsilon_{\downarrow} = \frac{\varepsilon_{ok}\varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varphi_{\downarrow}\varepsilon_{ok}(1 - \varepsilon_g)}, \varphi_{\downarrow} = \frac{S_{ok}}{S_g} = 1$; а также для ГС- ε_g и ОК- ε_{ok} .

В формулах выше $T_0 = 273,15 K$, $T_g(L) = T_{g0} + L \cdot grad(T_g)$, $^{\circ}C$ - абсолютная температура (по шкале Кельвина) и относительная (по шкале Цельсия) температура ГС, соответственно, К, $^{\circ}C$;

$S_{ok} = \pi D_{ok} L$ - площадь теплообмена между ГС и ОК, m^2 ;

$S_{ek} = \pi D_{ek} L$ - площадь теплообмена между э/н ОК-ЭК и э/н ОК, m^2 ;

$$\varepsilon_{\uparrow} = \frac{I}{\left[\frac{I}{\varepsilon_{\downarrow\uparrow}} + \varphi_{\uparrow} \left(\frac{I}{\varepsilon_{ok}} - I \right) + \frac{I}{\varepsilon_{ok}} + \varphi_{\downarrow} \left(\frac{I}{\varepsilon_g} - I \right) \right]}, \varphi_{\uparrow} = \frac{S_{ek}}{S_g}$$

- общий коэффициент черноты системы ГС-ОК-ЭК [16];

$\varepsilon_{\downarrow\uparrow}$ - общий коэффициент черноты ЭК с учётом термоизоляции;

$q_{\downarrow\uparrow}(L) = \sigma \varepsilon_{\downarrow\uparrow} \left\{ [T_{\uparrow}(L)]^4 - [T_{\downarrow}(L)]^4 \right\}$ - плотность теплового потока между э/н пространства ОК-ЭК и э/н пространства ЭК через стенку ЭК, $Вт/m^2$;

$\varepsilon_{\downarrow\uparrow} = \frac{\varepsilon_{ek} \varepsilon_i}{\varepsilon_i + \varphi_{\downarrow\uparrow} \varepsilon_{ek} (I - \varepsilon_i)}$, $\varphi_{\downarrow\uparrow} = \frac{S_{ek}}{S_i} = I$, где ε_{ek} , ε_i - коэффициент черноты стали и термоизоляции ЭК, соответственно.

Интегралы для расчета количества тепла, при замене $t = L/V$, имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} & \frac{\pi D_{ok}}{V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow}^{-} \int_0^{L_m} \left\{ \int_0^{L_m} \left[[T_0 + T_{g0} + L \cdot grad(T_g)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow 0} + L \cdot grad(T_{\downarrow})]^4 \right] L dL \right\} dL = \\ & = \left\{ \begin{array}{l} T_0 + T_{g0} = a_g \\ grad(T_g) = b_g \\ T_0 + T_{\downarrow 0} = a_{\downarrow} \\ grad(T_{\downarrow}) = b_{\downarrow} \end{array} \right\} = \frac{\pi D_{ok}}{V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow}^{-} \int_0^{L_m} \left\{ \int_0^{L_m} [a_g + b_g L]^4 L dL - \int_0^{L_m} [a_{\downarrow} + b_{\downarrow} L]^4 L dL \right\} dL = \\ & = \frac{\pi D_{ok}}{V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow}^{-} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} (a_g^4 - a_{\downarrow}^4) L_m^3 + \frac{4}{3} (a_g^3 b_g - b_{\downarrow} a_{\downarrow}^3) L_m^4 + \frac{6}{4} (a_g^2 b_g^2 - a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2) L_m^5 + \\ + \frac{12}{15} (a_g b_g^3 - a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3) L_m^6 + \frac{1}{6} (b_g^4 - b_{\downarrow}^4) L_m^7 \end{array} \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{\pi D_{ek}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow}^{-} \int_0^{L_m} \left\{ \int_0^{L_m} \left[\begin{array}{l} \varphi_e [T_0 + T_{g0} + L \cdot grad(T_g)]^4 - \\ - (\varphi_e - I) [T_0 + T_{\downarrow 0} + L \cdot grad(T_{\downarrow})]^4 - \\ - [T_0 + T_{\uparrow 0} + L \cdot grad(T_{\uparrow})]^4 \end{array} \right] L dL \right\} dL =$$

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} T_0 + T_{g0} &= a_g \\ \text{grad}(T_g) &= b_g \\ T_0 + T_{\uparrow 0} &= a_{\uparrow} \\ \text{grad}(T_{\uparrow}) &= b_{\uparrow} \\ T_0 + T_{\downarrow 0} &= a_{\downarrow} \\ \text{grad}(T_{\downarrow}) &= b_{\downarrow} \end{aligned} \right\} = \frac{\pi D_{ek}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow}^- \int_0^{L_m} \left\{ \begin{aligned} & \varphi_e \int_0^{L_m} [a_g + b_g L]^4 L dL - \\ & - (\varphi_e - 1) \int_0^{L_m} [a_{\downarrow} + b_{\downarrow} L]^4 L dL - \\ & - \int_0^{L_m} [a_{\uparrow} + b_{\uparrow} L]^4 L dL \end{aligned} \right\} dL = \quad , \text{ Дж}; \\
 & = \frac{\pi D_{ek}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow}^- \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} (\varphi_e a_g^4 - (\varphi_e - 1) a_{\downarrow}^4 - a_{\uparrow}^4) L_m^3 + \frac{4}{3} (\varphi_e a_g^3 b_g - (\varphi_e - 1) b_{\downarrow} a_{\downarrow}^3 - b_{\uparrow} a_{\uparrow}^3) L_m^4 + \\ & + \frac{6}{4} (\varphi_e a_g^2 b_g^2 - (\varphi_e - 1) a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2 - a_{\uparrow}^2 b_{\uparrow}^2) L_m^5 + \\ & + \frac{12}{15} (\varphi_e a_g b_g^3 - (\varphi_e - 1) a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3 - a_{\uparrow} b_{\uparrow}^3) L_m^6 + \frac{1}{6} (\varphi_e b_g^4 - (\varphi_e - 1) b_{\downarrow}^4 - b_{\uparrow}^4) L_m^7 \end{aligned} \right\} \\
 & \pi D_{ek} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\downarrow \uparrow}^- \int_0^{L_m} \left[\int_0^{L_m} \left\{ \begin{aligned} & [T_0 + T_{\uparrow 0} + L \cdot \text{grad}(T_{\uparrow})]^4 - \\ & - [T_0 + T_{\downarrow 0} + L \cdot \text{grad}(T_{\downarrow})]^4 \end{aligned} \right\} L dL \right] dL = \\
 & = \pi D_{ek} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\downarrow \uparrow}^- \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2} (a_{\uparrow}^4 - a_{\downarrow}^4) L_m^3 + \frac{4}{3} (a_{\uparrow}^3 b_{\uparrow} - b_{\downarrow} a_{\downarrow}^3) L_m^4 + \frac{6}{4} (a_{\uparrow}^2 b_{\uparrow}^2 - a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2) L_m^5 + \\ & + \frac{12}{15} (a_{\uparrow} b_{\uparrow}^3 - a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3) L_m^6 + \frac{1}{6} (b_{\uparrow}^4 - b_{\downarrow}^4) L_m^7 \end{aligned} \right\} , \text{ Дж}.
 \end{aligned}$$

Решение уравнения (1) относительно глубины скважины получено с использованием программного пакета MatLab. Аналитическое решение уравнения (1) затруднено.

Полученные результаты

Рассмотрено аналитическое решение уравнения (1) для средних значений температур э/н, которые определяются начальными и граничными условиями, как показано на рис.1, из системы уравнений (2):

$$\tilde{Q}_{\downarrow}(L) + \tilde{Q}_{\uparrow}(L) + \tilde{Q}_{ek}(L) + \Delta \tilde{Q}_{\downarrow \uparrow}(L) = \tilde{N}_{\downarrow}(L) t_{\downarrow} + \tilde{N}_{\uparrow}(L) t_{\uparrow} + \tilde{N}_{\downarrow \uparrow}(L) t_n , \quad \text{ Дж}, \quad (2)$$

где $\tilde{Q}_{\downarrow}(L) = m_{\downarrow}(L) c \tilde{T}_{\downarrow}$, $\tilde{Q}_{\uparrow}(L) = m_{\uparrow}(L) c \tilde{T}_{\uparrow}$, $\tilde{Q}_{ek}(L) = m_{ek}(L) c_{ek} \Delta \tilde{T}_{ek}(L)$,

$$\tilde{Q}_{\downarrow \uparrow}(L) = c \Delta \tilde{T}_{\downarrow \uparrow}(L=0) \frac{dm}{dt} t_n(L);$$

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{\downarrow}(L) \int_0^{t_{\downarrow}} dt(L) &= \frac{\pi D_{ok}}{V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow} \int_0^{L_m} \left[(T_0 + \tilde{T}_g)^4 \int_0^{L_m} L dL - \int_0^{L_m} (T_0 + \tilde{T}_{\downarrow m})^4 L dL \right] dL = \\ &= \frac{\pi D_{ok}}{2V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow} \left[(T_0 + \tilde{T}_g)^4 - (T_0 + \tilde{T}_{\downarrow m})^4 \right] L_m^3 \end{aligned}$$

Это общая тепловая энергия, переданная ГС со средней температурой \tilde{T}_g в пространство ОК-ЭК, где э/н нагревается до средней температуры \tilde{T}_{\downarrow} за время t_{\downarrow} , Дж;

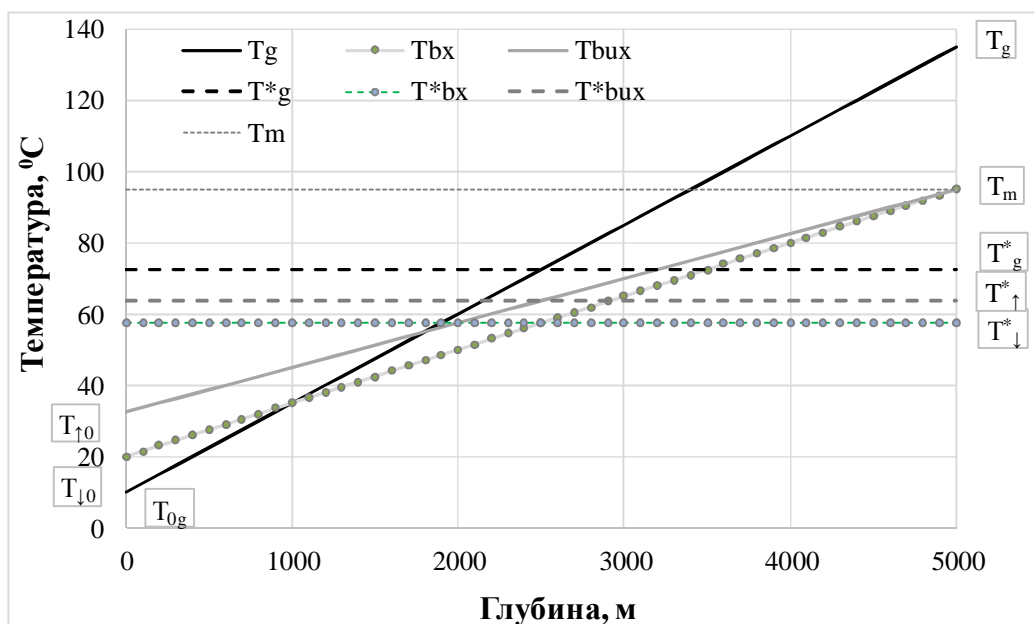


Рис. 1. Температурные профили энергоносителя в скважине:

$$T_g^* = \tilde{T}_g, T_{bux}^* = \tilde{T}_{\uparrow m}, T_{bx}^* = \tilde{T}_{\downarrow m}.$$

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{\uparrow}(L) \int_0^{t_{\uparrow}} dt(L) &= \frac{\pi D_{ek}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{L_m} \left[\int_0^{L_m} \left\{ \varphi_e [T_0 + \tilde{T}_g]^4 - (\varphi_e - 1) [T_0 + \tilde{T}_{\downarrow m}]^4 - [T_0 + \tilde{T}_{\uparrow m}]^4 \right\} L dL \right] dL = \\ &= \frac{\pi D_{ek}}{2V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \left\{ \varphi_e [T_0 + \tilde{T}_g]^4 - (\varphi_e - 1) [T_0 + \tilde{T}_{\downarrow m}]^4 - [T_0 + \tilde{T}_{\uparrow m}]^4 \right\} L_m^3 \end{aligned}$$

общая тепловая энергия, переданная ГС со средней температурой \tilde{T}_g к э/н, нагреваемому до средней температуры \tilde{T}_{\uparrow} , пространства ЭК через экран пространства ОК-ЭК за время t_{\uparrow} , Дж;

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{\downarrow\uparrow}(L) \int_0^{t_n} dt(L) &= \frac{\pi D_{ek}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{L_m} \left[\int_0^{L_m} \left\{ [T_0 + \tilde{T}_{\uparrow m}]^4 - [T_0 + \tilde{T}_{\downarrow m}]^4 \right\} L dL \right] dL = \\ &= \frac{\pi D_{ek}}{2V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow\uparrow} \left\{ [T_0 + \tilde{T}_{\uparrow m}]^4 - [T_0 + \tilde{T}_{\downarrow m}]^4 \right\} L_m^3 \end{aligned}$$

Это общая разность тепловой энергии между э/н пространств ОК-ЭК и ЭК за время t_n , которая возникает при отборе тепла на устье, Дж.

Для условия: $T_{\uparrow}(L) = T_{\downarrow}(L)$, когда $\Delta Q_{\uparrow\downarrow}(L) = 0, \tilde{N}_{\downarrow\uparrow}(L) = 0$, уравнение (2) имеет вид

$$[\tilde{T}_{\downarrow m} + T_0]^4 + A(\tilde{T}_{\downarrow m} + T_0) - B = 0, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где $A = \frac{2[m_{\downarrow}(L)c + m_{\uparrow}(L)c + m_{ek}(L)c_{ek}]}{\pi \sigma L_m^3 \left[\frac{D_{ok}}{V_{\downarrow}} \varepsilon_{\downarrow} + \frac{D_{ek}}{V_{\uparrow}} \varepsilon_{\uparrow} \rho_e \right]}$, $B = [T_0 + \tilde{T}_g]^4 + AT_0$ - известные

коэффициенты уравнения; $T_m = 2(\tilde{T}_{\downarrow m} + T_0) - 2T_0 - T_{\uparrow 0}$ - искомая температура э/н на забое, °С.

Данное условие выполнялось при проведении экспериментальных исследований на скважине Степная №120 [14] при разных продуктивностях насосов.

Уравнение (2) определяет максимальную температуру э/н на забое в скважине при разных продуктивностях насосов и известных стабильных температурах э/н на устье.

На рис.2 приведены результаты определения $T_m \left(\frac{dm}{dt} \right)$ в ISW-EGS по уравнению (3) с использованием экспериментальных данных температур э/н на устье для скважин исследованных на территориях Украины [14] и Азербайджана [3]. Данные измерений получены на устье и забое для двух скважин с петротермальной циркуляцией э/н. На рис.2 показаны результаты контроля с помощью энергетического метода по скв.10 месторождения Текчай [3] с параметрами: температура ГС 110 °С на глубине 3750 м, температура э/н во время промывки с производительностью насосов 30÷40 л/с на забое 83 °С и на устье 57 °С.

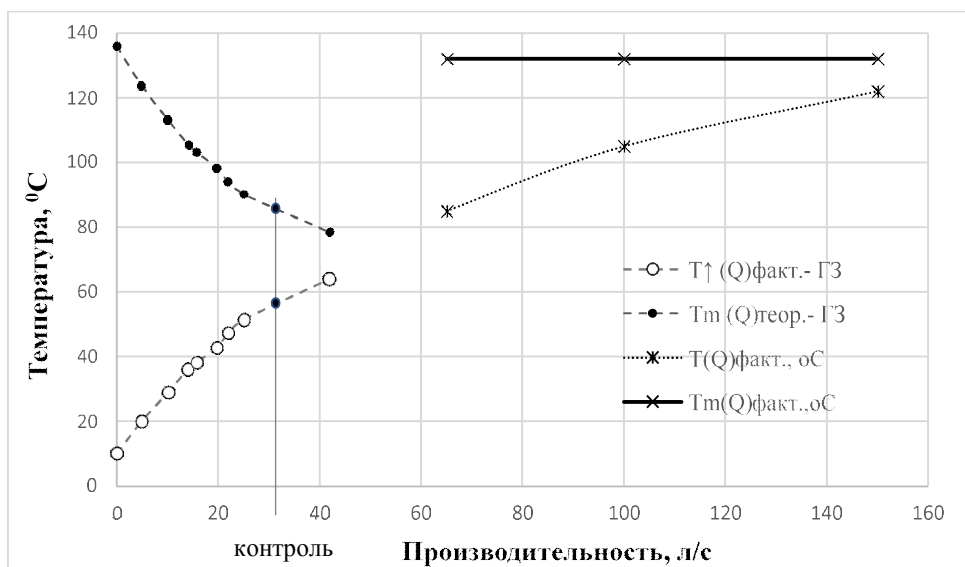


Рис.2. Характеристики температуры э/н на устье и забое при закрытой циркуляции ISW-EGS (Украина, Азербайджан) - $T_{\uparrow}(Q)_{\text{факт.}}-\text{ГЗ}$, $T_m(Q)_{\text{теор.}}-\text{ГЗ}$ и открытой петротермальной циркуляции EGS (ФРГ) - $T(Q)_{\text{факт.}}$, $T_m(Q)_{\text{факт.}}$. Контрольный замер по данным Азербайджана.

На данном рисунке, также изображены характеристики температуры пластовой воды: на устье - $T(Q)_{\text{факт.}}$ и на забое $T_{m-\text{факт.}}$, геотермальной энергетической установки (EGS с рабочей мощностью 37 МВт) открытого типа г.Унтерхагинг (ФРГ), полученные во время исследования продуктивной скважины Gt-1 глубиной 3350 м (вторая скважина нагнетательная).

На рис.3 представлены энергетические характеристики абсолютной тепловой мощности э/н на устье - $N_g, N_g(ГС)$ и мощности, которая теряется в ГС - $\Delta N_g, \Delta N_g(ГС)$ для скважин с закрытой и открытой циркуляцией э/н геотермальных станций ISW-EGS, данные скважин Степная №120 (5040 м) и Водяновская №2 (4000 м), $N_g(ГС)$ – комплексная характеристика максимальной мощности ГС (теоретические и экспериментальные данные); скважина Gt-1-открытая EGS (3350 м) (экспериментальные данные).

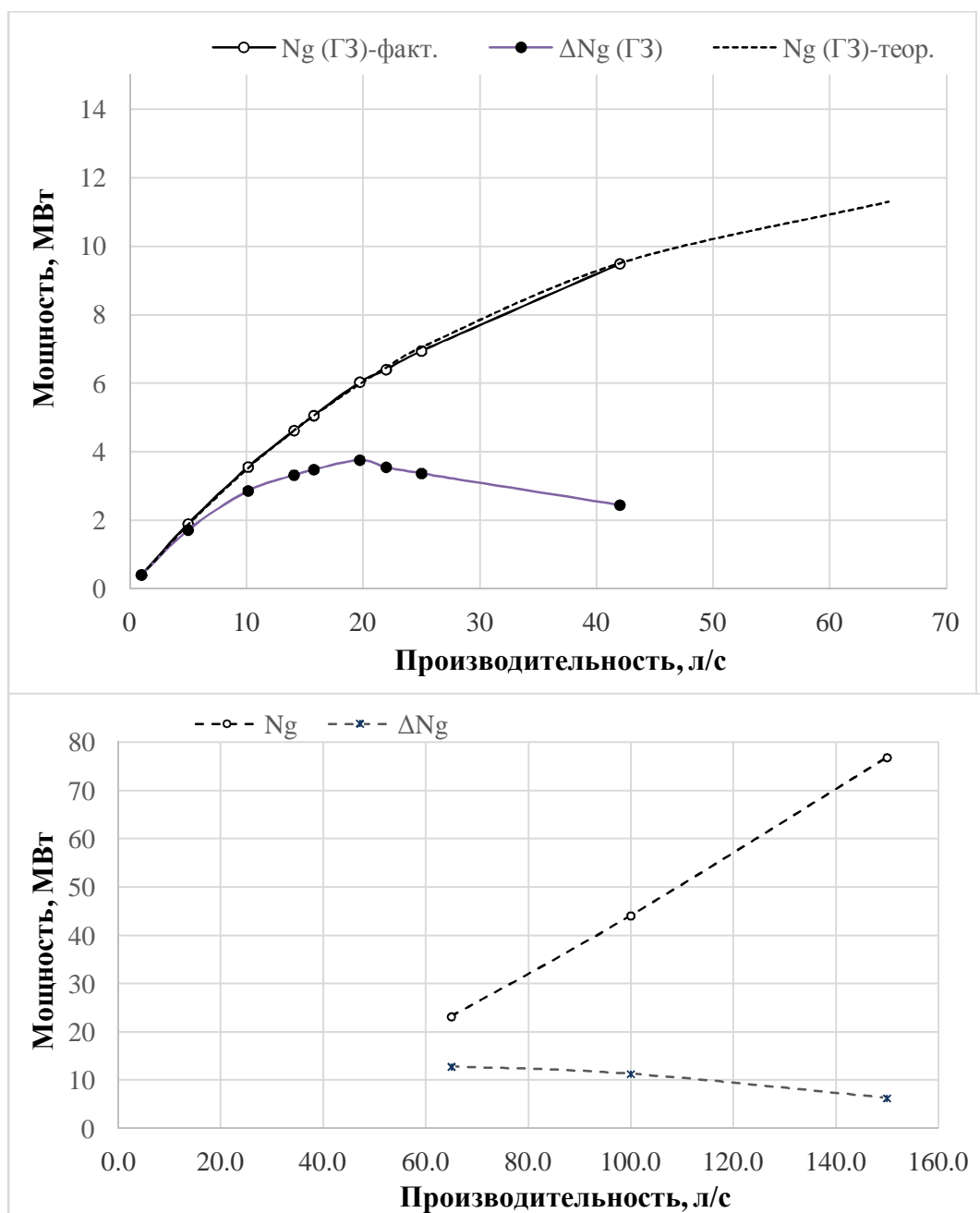


Рис.3. Характеристики тепловой мощности геотермальных станций: а) ISW-EGS на основе скважин Степная №120 (5040 м) и Водяновская №2 (4000 м) , где $N_g(ГС)_{\text{теор.}}$ – теоретическая комплексная характеристика максимальной мощности ГС ($N_g(ГС)_{\text{факт.}}$ - экспериментальные данные); б) Gt-1 - открытая EGS (3350 м) (экспериментальные данные: N_g – мощность э/н на устье скважины, ΔN_g – потери мощности э/н в верхних слоях ГС при движении вверх по скважине).

На рис.4 показаны характеристики изменения температуры бурового раствора на забое и устье скважин с различной глубиной и продуктивностью буровых насосов, полученные на основании данных, приведенных в работе [3].

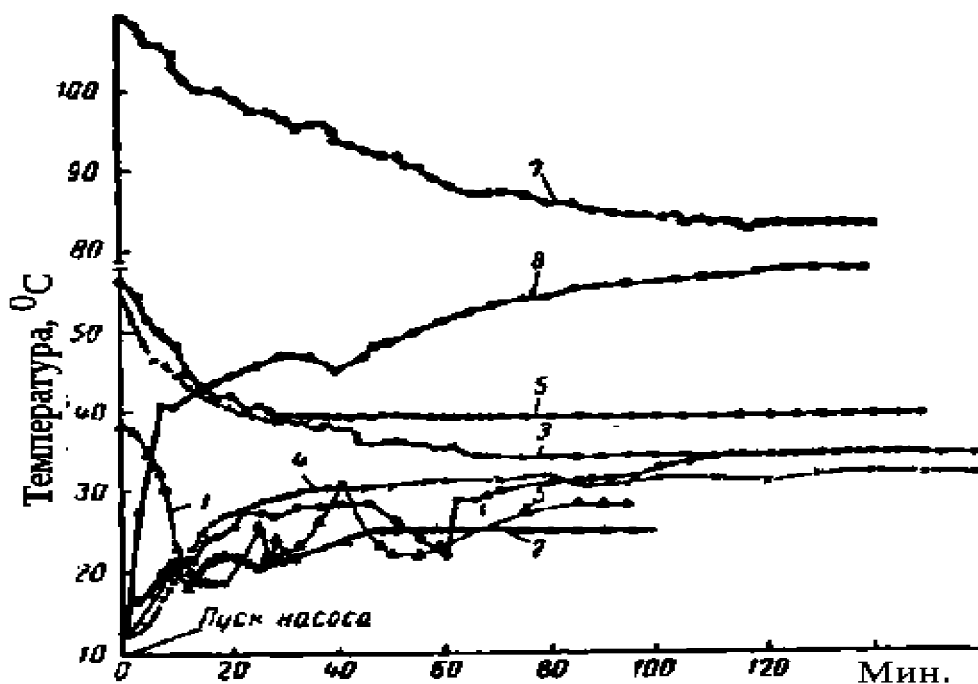


Рис.4. Характеристики зависимости температуры бурового раствора на забое и устье в зависимости от времени промывки скважин: 1,2 – скв.291 месторождения Карадаг на глубине 1071 м; 3,4 - скв.135 месторождения Карабаглы на глубине 2700 м; 5,6 - скв.169 месторождения Карабаглы на глубине 3150 м; 7,8 - скв.10 месторождения Текчай на глубине 3750 м (контроль данных представлен рис.2).

Обсуждение результатов

Полученные энергетические характеристики теплообмена в глубоких скважинах показывают эффективность использования геотермальной энергии с технологией ISW-EGS с мощностью близкой к 10 МВт в промышленности.

Контрольный замер показывает адекватность энергетического метода анализа параметров процесса теплообмена в глубокой одинокой изолированной скважине во время циркуляции в ней энергоносителя.

Выводы

Энергетический метод определения забойной температуры на основе закона лучистого теплообмена Стефана-Больцмана в ГС показывает адекватность теоретической зависимости изменения забойной и устьевой температур э/н от производительности буровых насосов при сравнении с экспериментальными данными.

Лучистый теплообмен в глубоких скважинах подтверждает правомерность идеи модели «горячей» Земли.

Литература

1. Geothermal Power Generation. Economically viable electricity generation through. Advanced geothermal energy technologies. Bassfeld Technology Transfer 2009: Switzerland. guenther@bassfeld.ch, 2009, 10 p.
https://static.aminer.org/pdf/PDF/000/244/989/systems_in_technology_transfer_introduction.pdf
2. Есьман Б. И / Влияние температуры на процесс бурения глубоких скважин / Есьман Б. И., Дедусенко Г. Я., Яишникова Е. А.// Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы. Москва 1962, 153.с.
3. Кулиев С.М. / Температурный режим бурящихся скважин / С. М. Кулиев, Б. И. Есьман, Г. Г. Габузов // Изд-во «Недра», 1968, 168 с.
4. Ming F. The temperature predictioning deepwater drilling of vertical well. A Dissertation. Texas A&M University May, 2011, 146 с.
5. Kujawa T., Nowak W. Thermal calculations of geothermal heat utilising one-well systems with both injection and production. Proc. World Geothermal Congress 2000. Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000, p.3483-3488.
6. Naim Afgan. New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development. CRC Press, 2004, 481 p.
7. Kujawa,T., Nowak W. Modified thermal calculations of a geothermal double-pipe heat exchanger with insulation immersed into geothermal deposit. Proc., Heat Transfer 2000, Madrid, 2000, p.314-317.
8. Kujawa,T., Nowak,W., Szaflik,W. Mathematical model of a geothermal Field exchanger. In: Mathematics of Heat Transfer, ed. G.E. Tupholme and A.S. Wood, Clarendon Press, Oxford, 1998, p.205-212
9. Fuzong Zhou Research on heat transfer in geothermal wellbore and surroundings. Dissertation. Der Technischen Universität Berlin. Oktober, 2013, 153 p.
10. Regenspurg S. Geothermal fluids - Monitoring in Groß Schönebeck. International Centre of Geothermal Research. Summer school GeoEn 2012, 92 с.
http://www.geo-x.net/8C389723-C532-455F-8F2E-730CBFE71625/FinalDownload/DownloadId-764F7943039D51F2A51ECDCEE8B22506/8C389723-C532-455F-8F2E-730CBFE71625/fileadmin/newsimages/summer_school_2012/geoen/summerschool_2012_regenspurg.pdf
11. Facies Differentiation of the Malm by Interpretation of Reflection Seismic Profiles and a Moving Source VSP Experiment Rüdiger Thomas and Rüdiger Schulz

- Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut), Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany. Proceedings European Geothermal Congress 2007. Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.
12. Макс Борн, Хуан Кунь Динамическая теория кристаллических решёток. пер. с англ. В.И. Когана под. ред. И.М. Лифшица, М., 1958, 488 с.
 13. Карпенко В.М. Організація системи автоматизованого управління процесом буріння на основі багатопараметричної інформаційної моделі. Дисертація, к.т.н. ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАНУ. Київ, 2001, 190 с.
 14. Стародуб Ю.П., Карпенко В.М., Стасенко В.М., Нікорюк М.С., Карпенко О.В., Рибчак В.Л. Аспекти оцінки та освоєння геотермальних ресурсів України. Геодинаміка, 2012, № 2(13), с. 95-105.
 15. Стародуб Ю.П., Карпенко В.М., Стасенко В.М. Енергетична і екологічна ефективність економіки України на основі власних геотермальних ресурсів (ГТР) Міжнародна конференція «Энергоэффективность в промышленности и АПК», 04-05 вересня 2014 року в м. Київ.
<http://energy-efficiency.in.ua/materialy-dlya-skachivaniya.html>
 16. Абдулагатова З.З. Теплопроводность сухих и флюидонасыщенных горных пород при высоких температурах и давлениях. Эксперимент и моделирование. Диссертация к.т.н. 2012. Махачкала, 171 с.

Primit la redacție – 26/08/2017