

Метод динамічної термометрії / Method of dynamical thermal logging

© **В. М. Карпенко / V. M. Karpenko**

канд. техн. наук / Ph D Tech.

В. М. Стасенко / V. M. Stasenko

канд. техн. наук / Ph D Tech.

VStasenko@naftogaz.com

Національна акціонерна компанія «Нафтогаз України» /

National Joint-Stock Company «Naftogaz of Ukraine»

УДК / UDC 622.02

Розглянуто теоретичні засади методу термометрії в глибокій свердловині під час циркуляції бурового розчину після кріплення її відкритого стовбура обсадною колоною. В основу математичних засобів і фізичного уявлення дії геотермального фактора на простір свердловини покладено закон Стефана–Больцмана. Метод використовує експериментальні дані.

Ключові слова: метод, термометрія, глибока свердловина, геотермальний фактор, закон Стефана–Больцмана.

Рассмотрены теоретические основы метода термометрии в глубокой скважине при циркуляции бурового раствора после крепления ее открытого ствола обсадной колонной. В основу математических средств и физического представления действия геотермального фактора на пространство скважины положен закон Стефана–Больцмана. Метод использует экспериментальные данные.

Ключевые слова: метод, термометрия, глубокая скважина, геотермальний фактор, закон Стефана–Больцмана.

The theoretical basis of the method of thermal logging in a deep hole during drilling mud circulation after fixing its open bore with casing was reviewed. The Stefan–Boltzmann law is taken as foundation of mathematical calculations and physical presentations of the action of geothermal factor on the well space. The method uses experimental data.

Key words: method, thermal logging, deep wells, geothermal factor, the Stefan–Boltzmann law.

Як відомо, під час буріння надглибоких свердловин, зокрема у нафтогазовій промисловості та геотермальній енергетиці, дуже важливим аспектом є контроль температури на вибої свердловини. Замір температури гірських порід виконують у статичному режимі промивальної рідини у свердловині (метод статичної термометрії – МСТ) після тривалого часу простою свердловини для вирівнювання температур уздовж всієї її глибини. Замірювання температури на вибої свердловини в динамічному режимі промивальної рідини за різних встановлених продуктивностей бурових насосів (метод динамічної термометрії – МДТ) здійснюють із використанням вибійних безпровідних датчиків температури і тиску.

У геотермальній галузі МДТ обов'язково використовують у технології «геотермальний зонд» (ГЗ) для освоєння геотермальних ресурсів поодинокими свердловинами.

Визначення вибійної температури промивальної рідини, тобто енергоносія (е/н), проведенням МДТ потребує значно більшої кількості часу порівняно з МСТ. Але МДТ, на відміну від МСТ, надає важливу інформацію про зміну щільності теплового потоку геотермального фактора (ГТФ), що діє з боку геологічного середовища (ГС) на простір свердловини за заданих параметрів ГЗ,

Тhe temperature control at the bottom-hole of the deep well is used in oil and gas industry and during geothermal studies.

Temperature of the rock is measured in the static regime of the drilling fluid in the well (method of the static thermal logging - MSTL) after long downtime for the well to equalize the temperatures along the well's depth.

Temperature of the bottom-hole is measured in the dynamic regime of the drilling fluid under different production levels of the mud pumps (method of the dynamical thermal logging - MDTL) with the usage of the wireless sensors of the bottom-hole temperature and pressure.

During the geothermal studies, MDTL is necessary to be used in the course of the «geothermal probe» (GP) technology usage for the development of the separate wells resources.

Estimation of the drilling fluid bottom-hole temperature (hereinafter referred to as energy carrier – e/c) by MDTL takes more days than the estimation by MSTL. But contrary to MSTL, MDTL provides the valuable information about changes in the thermal flux density of the geothermal factor (GF) which affects the well space from the side of the geological environment (GE) at the set-up parameters of the GP: geothermal gradient of rocks, well construction, thermophysical and rheological parameters and circulation

а саме: геотермального градієнта гірських порід, конструкції свердловини, теплофізичних і реологічних параметрів та режимів циркуляції е/н. Факт значної теплової дії ГТФ на е/н під час промивання і буріння глибоких свердловин на нафту і газ не пояснюється повністю законом Фур'є, згідно з яким щільність теплового потоку між горизонтальними поверхнями дорівнює $q_g = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$, а в просторі ГС на поверхні обсадної колони $q_g = \frac{2\pi\lambda}{D_c \ln\left(\frac{D_g}{D_c}\right)}(T_g - T_{e/n})$, Вт/м²,

де при $D_g \rightarrow \infty$, $q_g \rightarrow 0$, а при $D_g \rightarrow D_c$, $q_g \rightarrow \infty$ невизначеним залишається параметр D_g , що є основною науковою проблемою адекватності всіх моделей дії ГТФ.

Скорочення терміну проведення МДТ можливе завдяки моделюванню дії ГТФ на простір свердловини і е/н [1–5] за даними МСТ. Математичною основою існуючих моделей дії ГТФ на простір свердловини є модель теплообміну між гірськими породами, обсадною колоною (ОК), е/н у міжтрубному просторі, експлуатаційною колоною (ЕК) і е/н у просторі ЕК за законом теплопровідності Фур'є (далі математична модель – ММ ГТФ Фур'є). Ця модель передбачає контроль вхідної і вихідної температур е/н на усті свердловини і прогноз вибієної температури е/н за заданих вищезгаданих для ГЗ і довільно заданого параметра D_g .

Якщо використовувати ММ ГТФ Фур'є, то передбачається щільність теплового потоку $q_g = \lambda_g \cdot \text{grad}[T_g(L)]$, Вт/м² до 0,15 Вт/м², що обумовлює прогноз температури е/н на вибої за малих продуктивностей наземних насосів і наявності різниці вхідної $T_{\text{вх}}$ і вихідної $T_{\text{вих}}$ температур е/н на усті. У ситуації $T_{\text{вх}} = T_{\text{вих}}$ ММ ГТФ Фур'є втрачає інформативність.

Запропонований динамічний метод термометрії базується на основі теплообміну в ГЗ за законом Стефана–Больцмана, що узгоджує загальну щільність теплового потоку поверхні Землі, обумовленого інфрачервоними довгими хвилями (ІДХ) на рівні 340 Вт/м², у відкритий простір із щільністю теплового потоку в середині ГС на рівні до 0,15 Вт/м² як результат різного тепла гірських порід залежно від геостатичного тиску за законом теплопровідності Фур'є і узагальнює умови: $T_{\text{вх}} = T_{\text{вих}}$, $T_{\text{вх}} \neq T_{\text{вих}}$, що дає можливість визначати максимальну температуру е/н на вибої свердловини за значних продуктивностей насосів та параметри теплової енергії ГТЕУ типу ГЗ.

Фізичним уявленням роботи ГЗ є нагрівання е/н у свердловині геотермальною енергією гірських порід, що існує у вигляді локального мікрохвильового електромагнітного поля від напружених всебічним тиском атомів і молекул, коливання яких обумовлює температури Дебая і збільшення частот за глибиною ГС, швидкості акустичних хвиль і щільності теплової енергії.

Робота ГС у просторі свердловини ГЗ моделюється таким енергетичним рівнянням:

$$\begin{cases} Q_{\downarrow}(L) + Q_{\uparrow}(L) + Q_{\text{ек}}(L) + \Delta Q_{\uparrow\downarrow}(L) = \\ = \int_0^{t_{\downarrow}} N_{\downarrow}(L) dt(L) + \int_0^{t_{\uparrow}} N_{\uparrow}(L) dt(L) + \int_0^{t_{\text{н}}} N_{\downarrow\uparrow}(L) dt(L) \end{cases}, \text{ Дж}, \quad (1)$$

regimes for e/c. The fact of the prominent thermal effect of the GF on the e/c during the flushing and the drilling of deep wells for oil and gas is not fully explained by Fourier's law, according to which the density of the thermal flux between levels is equal to $q_g = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$, and in GE on the surface of the

casing string is equal to $q_g = \frac{2\pi\lambda}{D_c \ln\left(\frac{D_g}{D_c}\right)}(T_g - T_{e/n})$ W/m²,

whereat $D_g \rightarrow \infty$, $q_g \rightarrow 0$, and whereat $D_g \rightarrow D_c$, $q_g \rightarrow \infty$, the parameter D_g is indefinite, which is the main scientific problem for the adequacy of all GF models.

The shortening of MDTL conduction time can be resolved by building of the model for the GF effect on the well's space and e/c [1-5] according to the MSTL data. The mathematical framework of existing models for the GF effect on the well's space is the model of heat exchange between rocks, casing string (CS), e/cin shell side, production string (PS) and e/cin shell side of PS, according to the Fourier's Law of the thermal conductivity (hereinafter referred to as mathematical model–Fourier's MM of GF). The abovementioned model provides the control of the inlet and outlet temperature of e/con the wellhead and the forecast of the wellhead's temperature of e/c with set-up (abovementioned for GP) parameters during a priori of D_g parameter.

While Fourier's MM of GF is being used the density of the thermal flux is forecasted as $q_g = \lambda_g \cdot \text{grad}[T_g(L)]$, W/m² up to 0.15 W/m², and that is being used for the forecast of the e/c temperature on the well's bottomhole during low production levels of ground-based pumps and existing difference of the inlet $T_{\text{вх}}$ and outlet $T_{\text{вих}}$ of the e/c temperature on the wellhead. Fourier's MM of GF is not informative as for $T_{\text{вх}} = T_{\text{вих}}$ situation.

Dynamical method of thermal logging offered is based on the heat exchange in GP according to the Stefan–Boltzmann law, which sets the general density of the thermal flux of the Earth's surface conditioned by long infrared waves (LIRW) on the 340 W/m² to the open space with the density of the thermal flux at the middle of GE on the level of 0.15 W/m², resulted by the different levels of the rock's heat depending on the geostatic pressure according to the Fourier's law and generalizes conditions: $T_{\text{вх}} = T_{\text{вих}}$, $T_{\text{вх}} \neq T_{\text{вих}}$, which allows to determine the maximal temperature of e/c at the well's bottom hole in the high production levels of the pumps and the parameters of the heat energy of the geothermal energy facility of the geological probe type.

GP work is physically interpreted as the heating of e/c in the well by the rocks geothermal energy that exists as the local microwave electro-magnetic field with the intensified-pressured atoms and molecules vibrations of which cause the Debye's temperature and increase in the frequency of GE depth, the acoustic waves velocity and the density of thermal energy.

The work of GE in the well's space of GP is modelled by the following energy equation:

$$\begin{cases} Q_{\downarrow}(L) + Q_{\uparrow}(L) + Q_{\text{ек}}(L) + \Delta Q_{\uparrow\downarrow}(L) = \\ = \int_0^{t_{\downarrow}} N_{\downarrow}(L) dt(L) + \int_0^{t_{\uparrow}} N_{\uparrow}(L) dt(L) + \int_0^{t_{\text{н}}} N_{\downarrow\uparrow}(L) dt(L) \end{cases}, \text{ J}, \quad (1)$$

де $Q_{\downarrow}(L)=m_{\downarrow}(L)c\Delta T_{\downarrow}(L)$, $Q_{\uparrow}(L)=m_{\uparrow}(L)c\Delta T_{\uparrow}(L)$, $Q_{\text{ек}}(L)=m_{\text{ек}}(L)c_{\text{ек}}\Delta T_{\text{ек}}(L)$, $Q_{\downarrow\uparrow}(L)=c\Delta T_{\downarrow\uparrow}(L=0)\frac{dm}{dt}t_{\text{н}}(L)$ – накопичена теплова енергія e/n у просторах ОК–ЕК (рух вниз) і ЕК (рух вгору) матеріалом ЕК, e/n на усті, відповідно, за час циркуляції e/n у свердловині, Дж; $m_{\downarrow}(L)$, $m_{\uparrow}(L)$ – загальна маса e/n у свердловині в просторах ОК–ЕК та ЕК, кг; c – питома теплоємність e/n , Дж/(кг·°C); $N_{\downarrow}(L)=\int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow}(L)dS(L)$ – загальна теплова потужність від ГС до e/n простору ОК–ЕК, Вт; $N_{\uparrow}(L)=\int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\uparrow}(L)dS(L)$ – загальна теплова потужність від ГС до e/n простору ЕК, Вт; $\int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow}(L)dS(L)dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow} \int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{L_m} \left\{ [T_0 + T_g(L)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow}(L)]^4 \right\} L dL dL$ – загальна теплова енергія, що передана ГС у простір ОК–ЕК за час t_{\downarrow} руху e/n від устя до вибою, Дж;

$$\int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow}(L)dS(L)dt(L)=$$

$\frac{\pi D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{L_m} \left\{ \varphi_e [T_g(L)]^4 - (\varphi_e - 1) [T_{\downarrow}(L)]^4 - [T_{\uparrow}(L)]^4 \right\} L dL dL$ – загальна теплова енергія, що передана ГС у простір ЕК за час t_{\uparrow} руху e/n від вибою до устя, Дж; $N_{\downarrow\uparrow}(L)=\int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow\uparrow}(L)dS(L)$ – загальна теплова потужність між e/n простору ОК–ЕК і e/n простору ЕК, Вт; $q_{\downarrow}(L)$, $q_{\uparrow}(L)$, $q_{\downarrow\uparrow}(L)$ – щільності теплових потоків від ГС на e/n в просторі ОК–ЕК і ЕК та теплової взаємодії e/n простору ОК–ЕК із e/n простору ЕК, Вт/м²; dm/dt – продуктивність насосів, кг/с; $\int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow\uparrow}(L)dS(L)dt(L)=$

$\pi D_{\text{ек}} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\downarrow\uparrow} \int_0^{t_{\text{н}}} \int_0^{S_{\text{ок}}} \left\{ [T_0 + T_{\uparrow}(L)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow}(L)]^4 \right\} L dL dL$ – загальна теплова енергія обміну між енергоносіями крізь стінку ЕК за час $t_{\text{н}}=t_{\downarrow} + t_{\uparrow}$ перебування e/n у свердловині, Дж; $q_{\downarrow}(L)=\sigma \varepsilon_{\downarrow} \left[(T_0 + T_g(L))^4 - (T_0 + T_{\downarrow}(L))^4 \right]$ – щільність теплового потоку від ГС до e/n у просторі ОК–ЕК (прийнято, що температура ОК дорівнює температурі гірських порід), Вт/м²; $q_{\uparrow}(L)=\sigma \varepsilon_{\uparrow} \left\{ \varphi_e [T_g(L)]^4 - (\varphi_e - 1) [T_{\downarrow}(L)]^4 - [T_{\uparrow}(L)]^4 \right\}$, $\varphi_e = \frac{S_{\text{ок}}}{S_{\text{ек}}}$ – щільність теплового потоку від ГС крізь екран e/n простору ОК–ЕК до e/n із простору ЕК крізь ЕК, Вт/м²; $T_{\downarrow}(L)=T_{\downarrow 0} + L \cdot \text{grand}(T_{\downarrow})$ – температура e/n у свердловині, що рухається від устя до вибою, °C; $T_{\uparrow}(L)=T_{\uparrow m} - L \cdot \text{grand}(T_{\uparrow})$ – температура e/n у свердловині, що рухається від вибою до устя, °C; $\Delta T_{\downarrow}(L)=T_{\downarrow}(L) - T_{\downarrow 0}$ – температура нагрівання e/n у свердловині, що рухається від вибою устя до, °C; $\Delta T_{\uparrow}(L)=T_{\uparrow}(L) - T_{\uparrow 0}$ – температура охолодження e/n у свердловині, що рухається від вибою до устя, °C; $\Delta T_{\downarrow\uparrow}(L)=T_{\uparrow}(L) - T_{\downarrow}(L)$ – різниця температур e/n , який рухається вгору–вниз у свердловині, °C; $\Delta T_{\uparrow\downarrow}(L=0)=T_{\uparrow 0}(L) - T_{\downarrow 0}(L)$ – різниця між вихідною і вхідною температурами e/n на усті, °C; $m_{\text{ек}}$, $c_{\text{ек}}$ – маса і питома теплоємність ЕК відповідно, кг,

whereat $Q_{\downarrow}(L) = m_{\downarrow}(L)c\Delta T_{\downarrow}(L)$, $Q_{\uparrow}(L)=m_{\uparrow}(L)c\Delta T_{\uparrow}(L)cT$, $Q_{\text{ек}}(L)=m_{\text{ек}}(L)c_{\text{ек}}\Delta T_{\text{ек}}(L)$, $Q_{\downarrow\uparrow}(L)=c\Delta T_{\downarrow\uparrow}(L=0)\frac{dm}{dt}t_{\text{н}}(L)$ accumulated thermal energy of e/c in the space of CS-PS (movement downwards) and PS (movement upwards), material of PS, e/c at the wellhead, consequently for the circulation time of e/c in the well, J; $m_{\downarrow}(L)$, $m_{\uparrow}(L)$ – gross mass of e/c in the well in the spaces CS-PS and PS, kg; c – thermal mass of the e/c , J/(kg·°C); $N_{\downarrow}(L)=\int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow}(L)dS(L)$ – total thermal power from GE to e/c in the space of CS-PS, W; $N_{\uparrow}(L)=\int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\uparrow}(L)dS(L)$ – total thermal power from GE to e/c in the space of PS, W; $\int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow}(L)dS(L)dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}} \sigma \varepsilon_{\downarrow} \int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{L_m} \left\{ [T_0 + T_g(L)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow}(L)]^4 \right\} L dL dL$ – total thermal energy, transmitted by GE to the space of CS-PS during the time t_{\downarrow} of the e/c movement from the wellhead to the bottom hole, J; $N_{\downarrow\uparrow}(L)=\int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow\uparrow}(L)dS(L)$ – total thermal power between e/c in the space of CS-PS and e/c in the space of PS, W;

$$\int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow}(L)dS(L)dt(L)=$$

$\frac{\pi D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{L_m} \left\{ \varphi_e [T_g(L)]^4 - (\varphi_e - 1) [T_{\downarrow}(L)]^4 - [T_{\uparrow}(L)]^4 \right\} L dL dL$ – total thermal energy, transmitted by GE to the space of PS during the time t_{\uparrow} of the e/c movement from the bottom hole to the wellhead, J;

$$\int_0^{t_{\downarrow}} \int_0^{S_{\text{ок}}} q_{\downarrow\uparrow}(L)dS(L)dt(L)=$$

$\pi D_{\text{ек}} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\downarrow\uparrow} \int_0^{t_{\text{н}}} \int_0^{S_{\text{ок}}} \left\{ [T_0 + T_{\uparrow}(L)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow}(L)]^4 \right\} L dL dL$ – total thermal energy of interchange through the PS baffle during the time $t_{\text{н}}=t_{\downarrow} + t_{\uparrow}$ of the e/c stay in the well, J; $q_{\downarrow}(L)$, $q_{\uparrow}(L)$, $q_{\downarrow\uparrow}(L)$ – density of the thermal fluxes from GE on e/c in the spaces of CS-PS and PS, and thermal interface of e/c of the CS-PS space with e/c of the PS space, W/m²; $q_{\downarrow}(L)=\sigma \varepsilon_{\downarrow} \left[(T_0 + T_g(L))^4 - (T_0 + T_{\downarrow}(L))^4 \right]$ – density of the thermal flux from GE to e/c in the space of CS-PS (it is accepted that the temperature of PS is equal to the temperature of rock), W/m²; dm/dt – productivity of the pumps, kg/s; $q_{\uparrow}(L)=\sigma \varepsilon_{\uparrow} \left\{ \varphi_e [T_g(L)]^4 - (\varphi_e - 1) [T_{\downarrow}(L)]^4 - [T_{\uparrow}(L)]^4 \right\}$, $\varphi_e = \frac{S_{\text{ок}}}{S_{\text{ек}}}$ – density of thermal flux from GE through baffle of e/c of the CS-PS space to e/c from the PS space through PS, W/m²; $T_{\downarrow}(L)=T_{\downarrow 0} + L \cdot \text{grand}(T_{\downarrow})$ – temperature of e/c in the well that moves from the wellhead of the well to the bottomhole, °C; $T_{\uparrow}(L)=T_{\uparrow m} - L \cdot \text{grand}(T_{\uparrow})$ – temperature of e/c in the well that moves from the bottomhole of the well to the wellhead, °C; $\Delta T_{\downarrow}(L)=T_{\downarrow}(L) - T_{\downarrow 0}$ – heating temperature of e/c in the well that moves from the bottomhole of the well to the wellhead, °C; $\Delta T_{\uparrow}(L)=T_{\uparrow}(L) - T_{\uparrow 0}$ –

Дж/(кг·°C); $\Delta T_{\uparrow m}(L = L_m) = T_{\uparrow m}(L) - T_{\downarrow m}(L) = 0$ – різниця температур е/н на вибої, °C; $m_{ек}(L) = \rho_{ек} w_{ек}(L)$ – маса ЕК, кг; $w_{ек}(L) = \frac{\pi}{4}(D_{ек}^2 - d_{ек}^2)L$ – об'єм ЕК, м³; $\rho_{ек}$ – щільність матеріалу ЕК, кг/м³; $t_{\uparrow} = t_{\downarrow} + t_{\uparrow}$ – загальний час нагрівання е/н за продуктивності $\frac{dm}{dt}$, який рухається у просторі ОК–ЕК від устя до вибою за час t_{\downarrow} і від вибою до устя у просторі ЕК за час t_{\uparrow} , с, де $t_{\downarrow} = f\left(\frac{dm}{dt}\right)$ і $t_{\uparrow} = f\left(\frac{dm}{dt}\right)$, $t_{\downarrow} = \frac{L}{V_{\downarrow}}$,

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

$D_{ок}, d_{ок}, D_{ек}, d_{ек}$ – зовнішній і внутрішній діаметр ОК та ЕК відповідно, м; ρ – густина е/н, кг/м³; $W_{ок} = 0,25\pi(d_{ок}^2 - D_{ек}^2)L$, $W_{ек} = 0,25\pi d_{ек}^2 L$ – об'єми просторів ОК–ЕК і ЕК, визначені через діаметри $d_{ок}, D_{ек}, d_{ек}$ і глибину свердловини L відповідно, м²; $m_{\uparrow}(L) = \rho W_{ок}(L)$ – маса е/н у просторі ОК–ЕК, кг; $m_{\downarrow}(L) = \rho W_{ек}(L)$ – маса е/н у просторі ЕК, кг; $\varepsilon_{\downarrow} = \frac{\varepsilon_{ок} \varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varphi_{\downarrow} \varepsilon_{ок} (1 - \varepsilon_g)}$, $\varphi_{\downarrow} = \frac{S_{ок}}{S_g} = 1$ – загальний коефіцієнт чорноти ГС– ε_g і ОК– $\varepsilon_{ок}$; $S_{ок} = \pi D_{ок} L$ – площа теплообміну між ГС і ОК, м²; $T_0 = 273,15$ K, $T_g(L) = T_{g0} + L \cdot \text{grad}(T_g)$, °C – абсолютна (за шкалою Кельвіна) і відносна (за шкалою Цельсія) температури ГС; $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ – стала Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); $S_{ек} = \pi D_{ек} L$ – площа теплообміну між е/н ОК–ЕК і е/н ОК, м²;

$$\varepsilon_{\uparrow} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\varepsilon_{\downarrow}} + \varphi_{\uparrow} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ок}} - 1 \right) + \frac{1}{\varepsilon_{ок}} + \varphi_{\downarrow} \left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right) \right]}, \varphi_{\uparrow} = \frac{S_{ек}}{S_g}$$

– загальний коефіцієнт чорноти системи ГС–ОК–ЕК; ε_{\downarrow} – загальний коефіцієнт чорноти ЕК разом із термоізоляцією; $q_{\downarrow \uparrow}(L) = \sigma \varepsilon_{\downarrow \uparrow} \left\{ [T_{\uparrow}(L)]^4 - [T_{\downarrow}(L)]^4 \right\}$ – щільність теплового потоку між е/н простору ОК–ЕК і е/н простору ЕК крізь стінку ЕК, Вт/м²;

$$\varepsilon_{\downarrow \uparrow} = \frac{\varepsilon_{ек} \varepsilon_i}{\varepsilon_i + \varphi_{\downarrow \uparrow} \varepsilon_{ек} (1 - \varepsilon_i)}, \varphi_{\downarrow \uparrow} = \frac{S_{ек}}{S_i} = 1, \varepsilon_{ек}, \varepsilon_i$$
 – коефіцієнти чорноти сталі та термоізоляції ЕК відповідно.

Інтеграли тепла з заміною $t = L/V$ мають такі визначення:

$$\frac{\pi D_{ок} \sigma \varepsilon_{\downarrow}}{V_{\downarrow}} \int_0^{L_g} \left[\int_0^{L_g} \left\{ [T_0 + T_{g0} + L \cdot \text{grad}(T_g)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow 0} + L \cdot \text{grad}(T_{\downarrow})]^4 \right\} L dL \right] dL =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} T_0 + T_{g0} = a_g \\ \text{grad}(T_g) = b_g \\ T_0 + T_{\downarrow 0} = a_{\downarrow} \\ \text{grad}(T_{\downarrow}) = b_{\downarrow} \end{array} \right\} = \frac{\pi D_{ок} \sigma \varepsilon_{\downarrow}}{V_{\downarrow}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}(a_g^4 - a_{\downarrow}^4) L_m^3 + \frac{4}{3}(a_g^3 b_g - a_{\downarrow}^3 b_{\downarrow}) L_m^4 + \frac{6}{4}(a_g^2 b_g^2 - a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2) L_m^5 + \\ + \frac{12}{15}(a_g b_g^3 - a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3) L_m^6 + \frac{1}{6}(b_g^4 - b_{\downarrow}^4) L_m^7 \end{array} \right\},$$

Дж;

$$\frac{\pi D_{ек} \sigma \varepsilon_{\uparrow}}{V_{\uparrow}} \int_0^{L_g} \left[\int_0^{L_g} \left\{ \varphi_c [T_0 + T_{g0} + L \cdot \text{grad}(T_g)]^4 - \left(-(\varphi_c - 1) [T_0 + T_{\downarrow 0} + L \cdot \text{grad}(T_{\downarrow})]^4 - [T_0 + T_{\uparrow 0} + L \cdot \text{grad}(T_{\uparrow})]^4 \right) \right\} L dL \right] dL =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} T_0 + T_{g0} = a_g \\ \text{grad}(T_g) = b_g \\ T_0 + T_{\uparrow 0} = a_{\uparrow} \\ \text{grad}(T_{\uparrow}) = b_{\uparrow} \\ T_0 + T_{\downarrow 0} = a_{\downarrow} \\ \text{grad}(T_{\downarrow}) = b_{\downarrow} \end{array} \right\} = \frac{\pi D_{ек} \sigma \varepsilon_{\uparrow}}{V_{\uparrow}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}(\varphi_c a_g^4 - (\varphi_c - 1) a_{\downarrow}^4 - a_{\uparrow}^4) L_m^3 + \frac{4}{3}(\varphi_c a_g^3 b_g - (\varphi_c - 1) a_{\downarrow}^3 b_{\downarrow} - a_{\uparrow}^3 b_{\uparrow}) L_m^4 + \\ + \frac{6}{4}(\varphi_c a_g^2 b_g^2 - (\varphi_c - 1) a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2 - a_{\uparrow}^2 b_{\uparrow}^2) L_m^5 + \\ + \frac{12}{15}(\varphi_c a_g b_g^3 - (\varphi_c - 1) a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3 - a_{\uparrow} b_{\uparrow}^3) L_m^6 + \frac{1}{6}(\varphi_c b_g^4 - (\varphi_c - 1) b_{\downarrow}^4 - b_{\uparrow}^4) L_m^7 \end{array} \right\},$$

Дж;

cooling temperature of e/c in the well that moves from the wellhead to the bottomhole of the well, °C; $\Delta T_{\uparrow \downarrow}(L) = T_{\uparrow}(L) - T_{\downarrow}(L)$ – temperatures difference of the e/c that moves up-down in the well, °C; $\Delta T_{\uparrow \downarrow}(L = 0) = T_{\uparrow 0}(L) - T_{\downarrow 0}(L)$ – difference between inlet and outlet temperatures of e/c at the wellhead, °C; $\Delta T_{\uparrow \downarrow m}(L = L_m) = T_{\uparrow m}(L) - T_{\downarrow m}(L) = 0$ – temperatures difference of e/c at the bottomhole of well, °C; $m_{ек}, c_{ек}$ – mass and specific heat of PS, respectively, kg, J/(kg·°C); $m_{ек}(L) = \rho_{ек} w_{ек}(L)$ – mass of PS, kg; $w_{ек}(L) = \frac{\pi}{4}(D_{ек}^2 - d_{ек}^2)L$ – volume of PS, м³; $\rho_{ек}$ – density of the PS material, кг/м³; $t_{\uparrow} = t_{\downarrow} + t_{\uparrow}$ – total time of the e/c heating that moves in the CS-PS space from the bottomhole of the well to the wellhead, providing $\frac{dm}{dt}$ productivity, during time t_{\downarrow} and from the bottomhole of the well to the wellhead in the space of PS during time t_{\uparrow} , c, whereatand,

$$t_{\downarrow} = f\left(\frac{dm}{dt}\right) \text{ i } t_{\uparrow} = f\left(\frac{dm}{dt}\right), t_{\downarrow} = \frac{L}{V_{\downarrow}}, V_{\downarrow} = \frac{dm/dt}{\rho s_{\downarrow}}, t_{\uparrow} = \frac{L}{V_{\uparrow}},$$

$V_{\uparrow} = \frac{dm/dt}{\rho s_{\uparrow}}, s_{\uparrow} = \frac{\pi}{4}d_{ек}^2, s_{\downarrow} = \frac{\pi}{4}(d_{ок}^2 - D_{ек}^2), D_{ок}, d_{ок}, D_{ек}, d_{ек}$ – external and internal diameter of CS, PS respectively, m, density of e/c, кг/м³;

$W_{ок} = 0,25\pi(d_{ок}^2 - D_{ек}^2)L$, $W_{ек} = 0,25\pi d_{ек}^2 L$ – volumes of the CS-PS and PS spaces, determined through diameters $d_{ок}, D_{ек}, d_{ек}$ and the depth of well, respectively, м²;

$m_{\uparrow}(L) = \rho W_{ок}(L)$ – mass of e/c in the CS-PS space, кг; $m_{\downarrow}(L) = \rho W_{ек}(L)$ – mass of e/c in the PS space, кг;

$$\varepsilon_{\downarrow} = \frac{\varepsilon_{ок} \varepsilon_g}{\varepsilon_g + \varphi_{\downarrow} \varepsilon_{ок} (1 - \varepsilon_g)}, \varphi_{\downarrow} = \frac{S_{ок}}{S_g} = 1$$
 – gross coefficient of the GE emissivity – ε_g and CS $\varepsilon_{ок}$; $T_0 = 273,15$ K, $T_g(L) = T_{g0} + L \cdot \text{grad}(T_g)$, °C – absolute (according to the Kelvin scale) and relative (according to the Celsius scale) temperature of GE; $S_{ок} = \pi D_{ок} L$ – space of the heat interface between GE and CS, м²; $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ – constant of Stefan-Boltzmann, W/(м²·К⁴); $S_{ек} = \pi D_{ек} L$ – space of the heat interface between the CS-PS e/c and the PS e/c, м²;

$$\varepsilon_{\uparrow} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\varepsilon_{\downarrow}} + \varphi_{\uparrow} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ок}} - 1 \right) + \frac{1}{\varepsilon_{ок}} + \varphi_{\downarrow} \left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right) \right]}, \varphi_{\uparrow} = \frac{S_{ек}}{S_g}$$

gross coefficient of the GE-CS-PS system emissivity; $\varepsilon_{\downarrow \uparrow}$ – gross coefficient of PS emissivity including thermal insulation; $q_{\downarrow \uparrow}(L) = \sigma \varepsilon_{\downarrow \uparrow} \left\{ [T_{\uparrow}(L)]^4 - [T_{\downarrow}(L)]^4 \right\}$ – density of the thermal flux between the e/c of the CS-PS space and the e/c of the PS space through baffle of PS, Вт/м²;

$$\varepsilon_{\downarrow \uparrow} = \frac{\varepsilon_{ек} \varepsilon_i}{\varepsilon_i + \varphi_{\downarrow \uparrow} \varepsilon_{ек} (1 - \varepsilon_i)}, \varphi_{\downarrow \uparrow} = \frac{S_{ек}}{S_i} = 1, \varepsilon_{ек}, \varepsilon_i$$
 – coefficients of steel emissivity and the thermal insulation of PS, respectively.

Heat integrals, under a substitution $t = L/V$, will be characterized as following:

$$\frac{\pi D_{ок} \sigma \varepsilon_{\downarrow}}{V_{\downarrow}} \int_0^{L_g} \left[\int_0^{L_g} \left\{ [T_0 + T_{g0} + L \cdot \text{grad}(T_g)]^4 - [T_0 + T_{\downarrow 0} + L \cdot \text{grad}(T_{\downarrow})]^4 \right\} L dL \right] dL =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} T_0 + T_{g0} = a_g \\ \text{grad}(T_g) = b_g \\ T_0 + T_{\downarrow 0} = a_{\downarrow} \\ \text{grad}(T_{\downarrow}) = b_{\downarrow} \end{array} \right\} = \frac{\pi D_{ок} \sigma \varepsilon_{\downarrow}}{V_{\downarrow}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}(a_g^4 - a_{\downarrow}^4) L_m^3 + \frac{4}{3}(a_g^3 b_g - a_{\downarrow}^3 b_{\downarrow}) L_m^4 + \frac{6}{4}(a_g^2 b_g^2 - a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2) L_m^5 + \\ + \frac{12}{15}(a_g b_g^3 - a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3) L_m^6 + \frac{1}{6}(b_g^4 - b_{\downarrow}^4) L_m^7 \end{array} \right\},$$

Дж;

$$\pi D_{\text{ек}} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{L_m} \left[\int_0^{L_m} \left[T_0 + T_{\uparrow_0} + L \cdot \text{grad}(T_{\uparrow}) \right]^4 - \left[T_0 + T_{\downarrow_0} + L \cdot \text{grad}(T_{\downarrow}) \right]^4 \right] L dL =$$

$$= \pi D_{\text{ек}} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\uparrow} \left[\frac{1}{2}(a_{\uparrow}^4 - a_{\downarrow}^4)L_m^3 + \frac{4}{3}(a_{\uparrow}^3 b_{\uparrow} - b_{\downarrow} a_{\downarrow}^3)L_m^4 + \frac{6}{4}(a_{\uparrow}^2 b_{\uparrow}^2 - a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2)L_m^5 + \right.$$

$$\left. + \frac{12}{15}(a_{\uparrow} b_{\uparrow}^3 - a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3)L_m^6 + \frac{1}{6}(b_{\uparrow}^4 - b_{\downarrow}^4)L_m^7 \right],$$

Дж.

Оскільки рівняння (1) сьомого ступеня, то аналітичне розв'язання має суттєві труднощі. Для заданої точності розв'язання рівняння (1) можливе ітераційним методом із використанням програмної системи Mat Lab.

Розглянемо аналітичне розв'язання рівняння (1) для середніх значень температур, що визначаються за рівняннями системи (2) і які в графічному вигляді наведено на рис. 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{T}_g = 0,5(T_g + T_{g0}) - \text{середня температура ГС;} \\ \tilde{T}_{\uparrow} = 0,5(T_m - T_{\uparrow_0}) - \text{середня температура охолодження е/н в ЕК;} \\ \tilde{T}_{\downarrow} = 0,5(T_m - T_{\downarrow_0}) - \text{середня температура нагрівання е/н в ОК-ЕК;} \\ \Delta \tilde{T}_{\uparrow\downarrow} = 0,5(T_{\uparrow_0} - T_{\downarrow_0}) - \text{середня температура теплового навантаження ГЗ;} \\ \Delta \tilde{T}_{\text{ек}} = 0,5[T_m - 0,5(T_{\uparrow_0} + T_{\downarrow_0})] - \text{середня температура охолодження ЕК;} \\ \tilde{T}_{\downarrow m} = 0,5(T_m + T_{\downarrow_0}) - \text{середня температура нагрітого е/н ОК-ЕК;} \\ \tilde{T}_{\uparrow m} = 0,5(T_m + T_{\uparrow_0}) - \text{середня температура нагрітого е/н ЕК.} \end{array} \right. , (2)$$

Тоді рівняння (1) можна представити рівнянням четвертого ступеня відносно невідомих параметрів:

$$\text{grad}(T_{\uparrow}) = b_{\uparrow}, \text{grad}(T_{\downarrow}) = b_{\downarrow} \text{ або } \tilde{T}_{\uparrow m}, \tilde{T}_{\downarrow m}.$$

$$\tilde{Q}_{\downarrow}(L) + \tilde{Q}_{\uparrow}(L) + \tilde{Q}_{\text{ек}}(L) + \Delta \tilde{Q}_{\uparrow\downarrow}(L) = \tilde{N}_{\downarrow}(L)t_{\downarrow} + \tilde{N}_{\uparrow}(L)t_{\uparrow} + \tilde{N}_{\downarrow\uparrow}(L)t_{\uparrow\downarrow}, \text{ Дж, (3)}$$

$$\text{де } \tilde{Q}_{\downarrow}(L) = m_{\downarrow}(L)c_{\downarrow}\tilde{T}_{\downarrow}, \tilde{Q}_{\uparrow}(L) = m_{\uparrow}(L)c_{\uparrow}\tilde{T}_{\uparrow}, \tilde{Q}_{\text{ек}}(L) = m_{\text{ек}}(L)c_{\text{ек}}\Delta \tilde{T}_{\text{ек}}(L),$$

$$\frac{\pi D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{L_g} \left[\int_0^{L_g} \left[T_0 + T_{g0} + L \cdot \text{grad}(T_g) \right]^4 - \left[T_0 + T_{\uparrow_0} + L \cdot \text{grad}(T_{\uparrow}) \right]^4 \right] L dL =$$

$$= \frac{\pi D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}} \sigma \varepsilon_{\uparrow} \left[\frac{1}{2}(\varphi_e a_g^4 - (\varphi_e - 1)a_{\uparrow}^4 - a_{\downarrow}^4)L_m^3 + \frac{4}{3}(\varphi_e a_g^3 b_g - (\varphi_e - 1)b_{\downarrow} a_{\downarrow}^3 - b_{\uparrow} a_{\uparrow}^3)L_m^4 + \right.$$

$$\left. + \frac{6}{4}(\varphi_e a_g^2 b_g^2 - (\varphi_e - 1)a_{\uparrow}^2 b_{\uparrow}^2 - a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2)L_m^5 + \frac{12}{15}(\varphi_e a_g b_g^3 - (\varphi_e - 1)a_{\uparrow} b_{\uparrow}^3 - a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3)L_m^6 + \frac{1}{6}(\varphi_e b_g^4 - (\varphi_e - 1)b_{\uparrow}^4 - b_{\downarrow}^4)L_m^7 \right],$$

Ж;

$$\pi D_{\text{ек}} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\uparrow} \int_0^{L_m} \left[\int_0^{L_m} \left[T_0 + T_{\uparrow_0} + L \cdot \text{grad}(T_{\uparrow}) \right]^4 - \left[T_0 + T_{\downarrow_0} + L \cdot \text{grad}(T_{\downarrow}) \right]^4 \right] L dL =$$

$$= \pi D_{\text{ек}} \left(\frac{1}{V_{\uparrow}} + \frac{1}{V_{\downarrow}} \right) \sigma \varepsilon_{\uparrow} \left[\frac{1}{2}(a_{\uparrow}^4 - a_{\downarrow}^4)L_m^3 + \frac{4}{3}(a_{\uparrow}^3 b_{\uparrow} - b_{\downarrow} a_{\downarrow}^3)L_m^4 + \frac{6}{4}(a_{\uparrow}^2 b_{\uparrow}^2 - a_{\downarrow}^2 b_{\downarrow}^2)L_m^5 + \right.$$

$$\left. + \frac{12}{15}(a_{\uparrow} b_{\uparrow}^3 - a_{\downarrow} b_{\downarrow}^3)L_m^6 + \frac{1}{6}(b_{\uparrow}^4 - b_{\downarrow}^4)L_m^7 \right],$$

З.

The equation (1) is hard to be solved analytically as one that has the 7 degree. For the precision fixed, solution of the equation (1) is possible through iteration method with the usage of the software Mat Lab system.

Let's consider analytical solution of the equation (1) for the average values of the temperatures which can be determined for the initial and boundary conditions as indicated on picture 1, through equations of the system (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{T}_g = 0,5(T_g + T_{g0}) - \text{the average temperature GE;} \\ \tilde{T}_{\uparrow} = 0,5(T_m - T_{\uparrow_0}) - \text{the average temperature is cooling e/c space PS;} \\ \tilde{T}_{\downarrow} = 0,5(T_m - T_{\downarrow_0}) - \text{the average temperature is heating e/c in the space of CS-PS;} \\ \Delta \tilde{T}_{\uparrow\downarrow} = 0,5(T_{\uparrow_0} - T_{\downarrow_0}) - \text{the average temperature of the thermal load GP;} \\ \Delta \tilde{T}_{\text{ек}} = 0,5[T_m - 0,5(T_{\uparrow_0} + T_{\downarrow_0})] - \text{the average temperature in cooling PS;} \\ \tilde{T}_{\downarrow m} = 0,5(T_m + T_{\downarrow_0}) - \text{the average temperature in cooling PS;} \\ \tilde{T}_{\uparrow m} = 0,5(T_m + T_{\uparrow_0}) - \text{the average temperature is heating e/c space PS.} \end{array} \right. , (2)$$

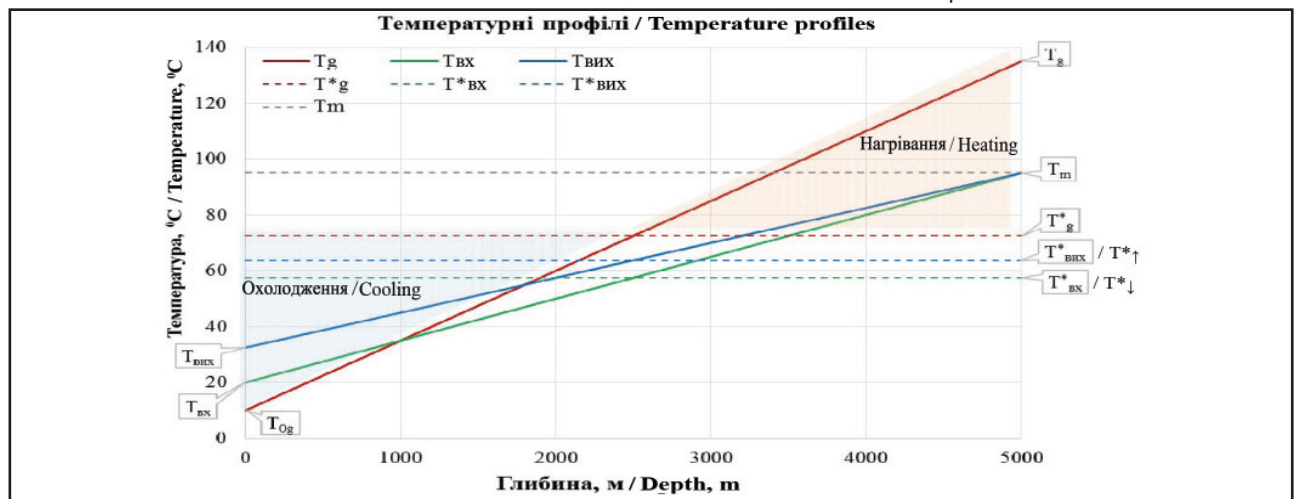


Рис. 1. Температурні профілі е/н у свердловині: / Fig. 1. Temperature profiles of e/c in the well:

$$T_g^* = \tilde{T}_g, T_{\text{вих}}^* = \tilde{T}_{\uparrow m}, T_{\text{ек}}^* = \tilde{T}_{\downarrow m},$$

$$T_{\text{вих}} = T_{\uparrow_0}, T_{\text{ек}} = T_{\downarrow_0}.$$

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

$$\tilde{N}_{\downarrow}(L)\int_0^{L_m} dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\int_0^{L_m}\left[(T_0+\tilde{T}_g)^4\int_0^{L_m}LdL-\int_0^{L_m}(T_0+\tilde{T}_{\downarrow m})^4LdL\right]dL=$$

$$=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{2V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\left[(T_0+\tilde{T}_g)^4-(T_0+\tilde{T}_{\downarrow m})^4\right]L_m^3$$

– загальна теплова енергія, що передана ГС із середньою температурою \tilde{T}_g у простір ОК–ЕК, де е/н нагрівається до середньої температури \tilde{T}_{\downarrow} за час руху е/н від устя до вибою, Дж;

$$\tilde{N}_{\downarrow}(L)\int_0^{L_m} dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\int_0^{L_m}\left\{\varphi_c[T_0+\tilde{T}_g]^4-(\varphi_c-1)[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}LdL=$$

$$=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{2V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\left\{\varphi_c[T_0+\tilde{T}_g]^4-(\varphi_c-1)[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}L_m^3$$

– загальна теплова енергія, що передана ГС із середньою температурою \tilde{T}_g до е/н, що нагрівається до середньої температури \tilde{T}_{\uparrow} простору ЕК крізь екран простору ОК–ЕК за час руху е/н від вибою до устя, Дж;

$$\tilde{N}_{\uparrow}(L)\int_0^{L_m} dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}}\sigma\varepsilon_{\uparrow}\int_0^{L_m}\left\{[T_0+\tilde{T}_{\uparrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}LdL=$$

$$=\frac{\pi D_{\text{ек}}}{2V_{\uparrow}}\sigma\varepsilon_{\uparrow}\left\{[T_0+\tilde{T}_{\uparrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}L_m^3$$

– загальна різниця теплової енергії між енергоносійми просторів ОК–ЕК і ЕК за час перебування е/н у свердловині, що виникає внаслідок відбору тепла на усті, Дж.

Для умови: $T_{\uparrow}(L)=T_{\downarrow}(L)$, коли $\Delta Q_{\uparrow}(L)=0$, $\tilde{N}_{\downarrow}(L)=0$, рівняння (3) має вигляд

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

$$\text{де } A=\frac{2[m_{\downarrow}(L)c+m_{\uparrow}(L)c+m_{\text{ек}}(L)c_{\text{ек}}]}{\pi\sigma L_m^3\left[\frac{D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}}\varepsilon_{\downarrow}+\frac{D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}}\varepsilon_{\uparrow}\varphi_c\right]}, B=[T_0+\tilde{T}_g]^4+AT_0$$

– відомі коефіцієнти рівняння; $T_m=2(\tilde{T}_{\downarrow m}+T_0)-2T_0-T_{\uparrow 0}$
– шукана температура е/н на вибої, °С.

Із рівняння (4) визначаємо максимальну температуру е/н на вибої у свердловині за різних продуктивностей насосів і відомих сталих температур е/н на усті, тобто

Then equation (1) can be considered as equation of the 4 degree in the unknown parameters: $(T_{\uparrow})=b_{\uparrow}$, $\text{grad}(T_{\downarrow})=b_{\downarrow}$ or $\tilde{T}_{\uparrow m}, \tilde{T}_{\downarrow m}$.

$$\tilde{Q}_{\downarrow}(L)+\tilde{Q}_{\uparrow}(L)+\tilde{Q}_{\text{ек}}(L)+\Delta\tilde{Q}_{\uparrow}(L)=\tilde{N}_{\downarrow}(L)t_{\downarrow}+\tilde{N}_{\uparrow}(L)t_{\uparrow}+\tilde{N}_{\downarrow}(L)t_{\text{н}}J, \quad (3)$$

whereat $\tilde{Q}_{\downarrow}(L)=m_{\downarrow}(L)c\tilde{T}_{\downarrow}$, $\tilde{Q}_{\uparrow}(L)=m_{\uparrow}(L)c\tilde{T}_{\uparrow}$, $\tilde{Q}_{\text{ек}}(L)=m_{\text{ек}}(L)c_{\text{ек}}\Delta\tilde{T}_{\text{ек}}(L)$,

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

$$\tilde{N}_{\downarrow}(L)\int_0^{L_m} dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\int_0^{L_m}\left[(T_0+\tilde{T}_g)^4\int_0^{L_m}LdL-\int_0^{L_m}(T_0+\tilde{T}_{\downarrow m})^4LdL\right]dL=$$

$$=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{2V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\left[(T_0+\tilde{T}_g)^4-(T_0+\tilde{T}_{\downarrow m})^4\right]L_m^3$$

– total thermal energy transmitted by GE with the average temperature \tilde{T}_g to the CS-PS space, where e/c is being heated to the average temperature \tilde{T}_{\downarrow} during a period of the e/c movement from the wellhead to the bottomhole of the well, J;

$$\tilde{N}_{\downarrow}(L)\int_0^{L_m} dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\int_0^{L_m}\left\{\varphi_c[T_0+\tilde{T}_g]^4-(\varphi_c-1)[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}LdL=$$

$$=\frac{\pi D_{\text{ок}}}{2V_{\downarrow}}\sigma\varepsilon_{\downarrow}\left\{\varphi_c[T_0+\tilde{T}_g]^4-(\varphi_c-1)[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}L_m^3$$

– total thermal energy transmitted by GE with the average temperature \tilde{T}_g to e/c which is being heated to the average temperature \tilde{T}_{\downarrow} , of the PS space through a baffle of the CS-PS space during a period of the e/c movement from the bottomhole of the well to the wellhead, J;

$$\tilde{N}_{\uparrow}(L)\int_0^{L_m} dt(L)=\frac{\pi D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}}\sigma\varepsilon_{\uparrow}\int_0^{L_m}\left\{[T_0+\tilde{T}_{\uparrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}LdL=$$

$$=\frac{\pi D_{\text{ек}}}{2V_{\uparrow}}\sigma\varepsilon_{\uparrow}\left\{[T_0+\tilde{T}_{\uparrow m}]^4-[T_0+\tilde{T}_{\downarrow m}]^4\right\}L_m^3$$

– total difference of the thermal energy between energy carriers of the CS-PS and PS spaces for the time of the e/c stay in the well which is caused by heat extraction at the wellhead, J.

For condition: $T_{\uparrow}(L)=T_{\downarrow}(L)$ whereat $\Delta Q_{\uparrow}(L)=0$, $\tilde{N}_{\downarrow}(L)=0$, equation (2) will be the following

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

whereat

$$A=\frac{2[m_{\downarrow}(L)c+m_{\uparrow}(L)c+m_{\text{ек}}(L)c_{\text{ек}}]}{\pi\sigma L_m^3\left[\frac{D_{\text{ок}}}{V_{\downarrow}}\varepsilon_{\downarrow}+\frac{D_{\text{ек}}}{V_{\uparrow}}\varepsilon_{\uparrow}\varphi_c\right]}, B=[T_0+\tilde{T}_g]^4+AT_0$$

– known coefficients of the equation;

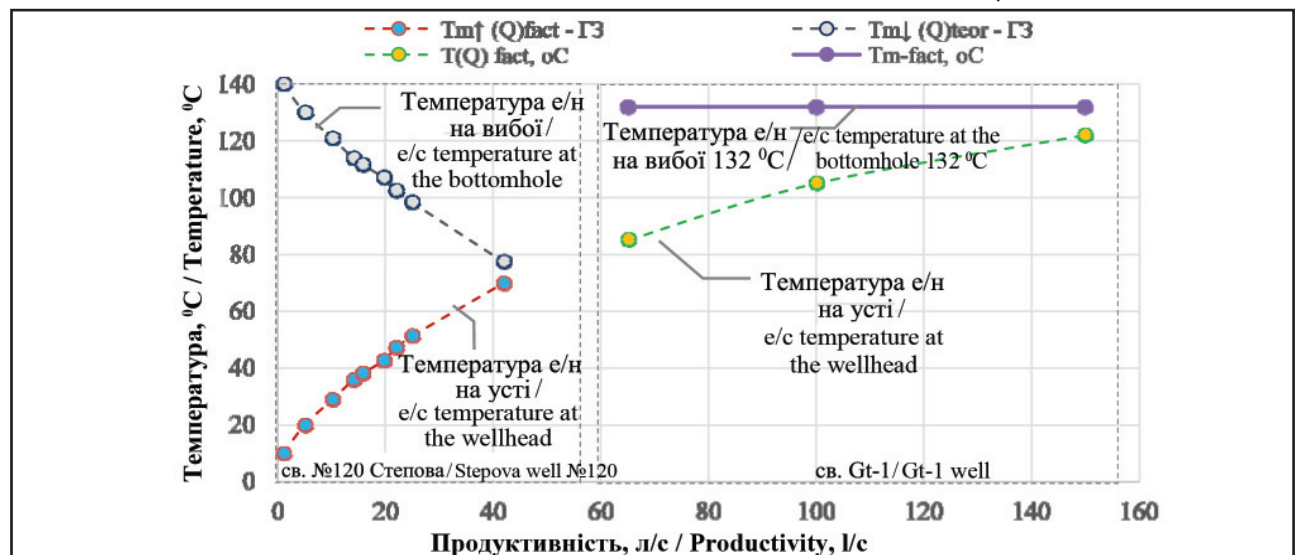


Рис. 2. Характеристики температури е/н на усті і вибої закритої ГТЕУ (Україна) типу ГЗ і відкритої ГТЕУ (Німеччина) / Fig. 2. Temperature characteristics of e/c at the wellhead and bottomhole of closed GEF(Ukraine) of GP type and open GEF(Germany)

$$T_m \left(\frac{dm}{dt} \right) = 2 \left(\left\{ z_{1,2,3,4} \left(\frac{dm}{dt} \right) \right\} - T_0 \right) - T_{\uparrow 0} \left(\frac{dm}{dt} \right). \quad (5)$$

На рис. 2 наведено результати визначення $T_m \left(\frac{dm}{dt} \right)$ із використанням експериментальних даних температури е/н на усті під час дослідження геотермального фактора у св. 120-Степовій (Україна) [6]. На цьому рисунку також наведено характеристики температури пластової води на усті – $T(Q)_{fact}$ і на вибої – T_{m-fact} геотермальної енергетичної установки (ГТЕУ з робочою потужністю 37 МВт) відкритого типу у м. Unterhaching (Німеччина), які отримані під час досліджень видобувної св. Gt-1 завглибшки 3350 м.

На рис. 3 наведено характеристики абсолютної теплової потужності, що генерується ГТЕУ – N_g, N_g (ГЗ) і що втрачається – $\Delta N_g, \Delta N_g$ (ГЗ) під час підняття пластової води на земну поверхню у св. Gt-1 та під час циркуляції бурового розчину у

$T_m = 2(\tilde{T}_{\downarrow m} + T_0) - 2T_0 - T_{0\uparrow}$ – desired temperature of the e/c at the well bottomhole, °C.

Through equation (4) can be determined the maximal temperature of the e/c at the well bottomhole provided different production levels of the pumps and known constant temperature of the e/c at the wellhead

$$T_m \left(\frac{dm}{dt} \right) = 2 \left(\left\{ z_{1,2,3,4} \left(\frac{dm}{dt} \right) \right\} - T_0 \right) - T_{\uparrow 0} \left(\frac{dm}{dt} \right). \quad (5)$$

On the picture 2 the results $T_m \left(\frac{dm}{dt} \right)$ of determination through equation (8) with the usage of the experimental e/c temperature data at the wellhead during geothermal factor of the Stepova well №120 (Ukraine) [6] are indicated.

On the picture, there are also characteristics of the stratal waters are indicated: at the wellhead – $T(Q)_{fact}$ and at the bottomhole – T_{m-fact} of the geothermal energy facility (GEF with the producing capacity 37 MW) of the open type in the city of Unterhaching (Germany). The characteristics were received during surveys of the Gt-1 production well with the depth of 3,350 m.

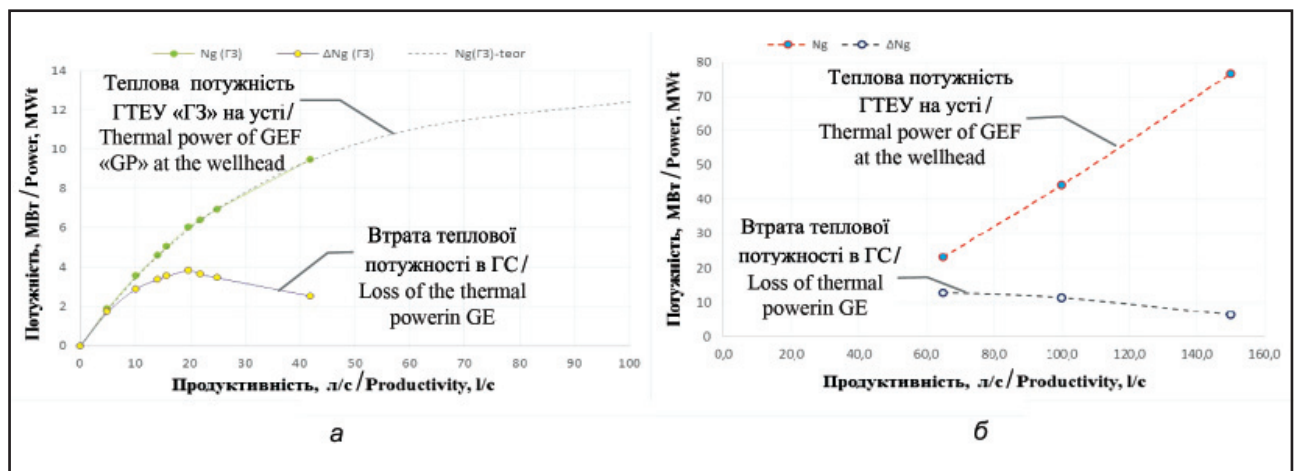


Рис. 3. Характеристики теплової потужності ГТЕУ: а – на основі св. 120-Степової (прототип ГЗ), де N_g (ГЗ)-teor – характеристика, що прогнозує максимальну потужність ГЗ з глибини 4000 м, з якої 50 % поглинають верхні гірські породи ГС; б – Gt-1- відкрита ГТЕУ, що складається з нагнітальної і видобувної свердловин (експериментальні дані) /

Fig. 3. Characteristics of the GEF thermal power: a – based on the information about the Stepovawell №120 (GPprototype), whereat N_g (GP) - teor is the characteristic forecasts maximal power of GE from the depth of 4000 m, 50% of which are absorbed by upper rocks of GE; б – Gt-1- GEF of open type which consists of the pressure and the production wells (experimental data)

св. 120-Степовій. Аналіз характеристик показує, що технологія освоєння ГТР за технологією «геотермальний зонд» має соціальне та промислове значення.

Аналіз результату

Практичний інтерес являє собою порівняння техніко-економічних показників геотермальних генераторів тепла типу ГЗ із традиційними, що на сьогодні використовують у комунальних, промислових і сільських господарствах.

Так, у таблиці наведено основні техніко-економічні показники (ТЕП) використання газових котлів типу КСВ-5,0 і перспективної ГТЕУ типу ГЗ. Наведені ТЕП свідчать про економічну доцільність ГТЕУ типу ГЗ, окупність якої не буде перевищувати 2 років за потужності близько 6 МВт та менше 1 року – за потужності 10 МВт.

On the picture 3 indicated energy characteristics of the absolute thermal power which is produced by – N_g, N_g (GP) and these which are lost – $\Delta N_g, \Delta N_g$ (GP) during the period of the formation water rising to the earth's surface in the Gt-1 well and during the circulation of the drilling mud in the Stepova well №120. Analysis of the characteristics has shown that technology of the geothermal resources development through “geothermal probe” technology is socially and commercially productive.

Analysis of the results

The comparison between the technical-economical parameters of the geothermal heat generators of the GP type and the traditional generators being used nowadays in the communal services, production and the agricultural industry has the practical character.

Thus in the table 1 the main technical-economical parameters (TEP) of the gas boilers of

Таблиця

ТЕП котла КСВ-5,0 і ГТЕУ типу «Геотермальний зонд»

Показник	КСВ-5,0	ГТЕУ «Зонд»
Витрати палива: газ природний (ГОСТ 5542-87), м ³ /год, не більше	600	0
млн м ³ /рік, не більше	3,9	0
Номінальна теплопродуктивність, МВт (Гкал/год)	5,0 (4,30)	0÷10 (8,6)
Витрати води, л/с	25	0÷50
Мінімальна температура води на вході, °С	70	30
Максимальна температура води на виході, °С	115	100
Водяний об'єм, м ³	12,5	180
Ресурс котла, років	5	30
Строк служби котла, років	15	30
Коефіцієнт корисної дії %: газ природний (ГОСТ 5542-87)	92	95
Питомий викид оксиду вуглецю, мг/м ³ : газ природний (ГОСТ 5542-87), не більше	130	0
Питомий викид оксидів азоту, мг/м ³ : газ природний (ГОСТ 5542-87), не більше	120	0
Рівень звуку в контрольних точках, дБА, не більше	80	–
Установлена електрична потужність, кВт	до 100	до 350–400
Вартість пального (природного газу) без витрат на електричну енергію (200 дол. США за 1000 м ³) ¹ , млн дол. США	0,780	0
Вартість проекту (25 грн за 1 дол. США), млн дол. США	0,3	2,5
Вартість генерованої теплової енергії (1550,6 грн/Гкал з ПДВ) ² при 25 грн за 1 дол. США, млн дол. США	365-24-0,75- 6667,58/25= 1,7522	365-24-0,75- 2-6667,58/25= 3,5044

¹Інтерфакс-Україні: 09:34 12.02.2016²Постанова НКРЕКУ від 28.01.2016 №54

Виконані дослідження дають можливість зробити висновок.

Висновок

Метод динамічної термометрії дає можливість виконувати оцінку температури енергоносія на вибої при різних продуктивностях насосів.

Список використаних джерел / Bibliography

- Кулиев С.М.** Температурный режим бурящихся скважин /С.М. Кулиев, Б.И. Есьман, Г.Г. Габузов. – М.: Недра, 1968. – С. 168.
- Ming F.** The temperature prediction in deepwater drilling of vertical well. A Dissertation // Texas A&M University, May, 2011. – С. 146.
- Kujawa, T.** Nowak W. Thermal calculations of geothermal heat utilising one-well systems with both injection and production. Proceedings World Geothermal Congress 2000 / Kyushu–Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000. – P. 3483–3488.
- Fuzong Zhou.** Research on heat transfer in geothermal wellbore and surroundings. Dissertation/ Der Technischen Universität Berlin, Oktober, 2013. – 153 p.
- Regenspurg S.** Geothermal fluids – Monitoring in Groß Schönebeck. International Centre of Geothermal Research. Summer school GeoEnte 2012. – 92 p.
- Карпенко В.М.** Стан і перспективи використання глибоких свердловин для забезпечення споживачів тепловою та електричною енергією / В.М. Карпенко, В.М. Стасенко, А.О. Михальчишин [та ін.] // Нафтогазова галузь України. – 2015. – № 3. – С. 39–47.

(Переклад Кирила Борділовського)

the KCB-5,0 type and the perspective GEF of the GP type are indicated.

Shown TEP are indicating the economic expediency of the GEF of the GP type, payback period of which will not exceed 2 years with the power around 6 MW and not more than 1 year with the power of 10 MW.

Table 1

TEP of the KCB-5,0 boiler and GEF of the «Geothermal probe» type

Indicator	KCB-5,0	GEF «Probe»
Fuel consumption rate: - natural gas (GOST 5542-87), m ³ /year, equal or less mmcm/annum, equal or less	600 3.9	0 0
Nominal thermal productivity, MW (Gcal/hr)	5.0 (4.30)	0÷10 (8.6)
Water flow, l/s	25	0÷50
Minimal water temperature at the inlet, °C	70	30
Maximal water temperature at the outlet, °C	115	100
Water volume, m ³	12.5	180
Boiler resource, years	5	30
Boiler working period, years	15	30
Coefficient of efficiency %: - natural gas (GOST 5542-87)	92	95
Specific flow of the carbonic oxide, mg/m ³ : - natural gas (GOST 5542-87), no greater	130	0
Specific flow of the nitrogen oxide, mg/m ³ : - natural gas (GOST 5542-87), no greater	120	0
Sound level at the control points, dBA, no greater	80	–
Electric power installed, kW	Up to 100	Up to 350-400
Fuel price (natural gas) excluding expenses on the electrical energy (\$200/1,000 m ³) ¹ , \$ mln.	0.780	0
Project cost (€25/\$1), \$. mln.	0.3	2.5
Cost of the thermal energy generated (€1,550.6/Gcal with VAT) ² at €25 / \$1, \$ mln.	365-24-0.75- 6667.58/25 = 1.7522	365-24-0.75- 2-6667.58/25 = 3.5044

¹Interfax-Ukraine: 12/2/2016 9:34²NKREKU Decision of 28.01.2016 №54

Surveys conducted allow to make the following conclusions.

Conclusions

Method of the dynamical thermal logging allows estimation of the geothermal resource of the dry rock with the usage of the geothermal probe technology from the minimal value of the resource to its maximal value depending on the necessary temperatures of e/c on the earth's surface which is adjusted by productivity of the pumps provided set up construction of the well and geothermal gradient.