

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 3, Number 441 (2020), 16 – 23

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.49>

UDC 537.9

IRSTI 29.19.23

Zh. M. Kassenova¹, B. T. Yermagambet¹, G. E. Remnev²,
S. M. Martemyanov², A. A. Bukharkin², N. U. Nurgaliyev¹

¹“Institute of Coal Chemistry and Technology” LLP, Nur-Sultan, Kazakhstan;

²“National Research Tomsk Polytechnical University”, Tomsk, Russia.

E-mail: zhanar_k_68@mail.ru, bake.yer@mail.ru, remnev@tpu.ru, martemyanov@tpu.ru, ater@tpu.ru

SIMULATION OF SUBTERRANEAN HEATING OF COAL BY PASSING ELECTRICAL CURRENT THROUGH ELECTROTHERMAL BREAKDOWN CHANNEL

Abstract. The paper describes a mathematical model that simulates the heating of an underground coal bed by passing electrical current through electrothermal breakdown channel. The breakdown channel, which is a heat source, is formed between two electrodes located in the wells inside the subterranean formation. The electrodes are connected by cables to the aboveground electrical equipment. The diameter of electrothermal breakdown channel at the time of formation is small, and it expands as the coal is heated and carbonized in the vicinity of the channel. The distance between the electrodes is set to 0.5 meters. The values of dielectric and thermal properties are taken on the basis of experimental and literature data for the coals of the Republic of Kazakhstan. The time dependences of the temperature in the center of the heated part of the reservoir at different heating powers are obtained. The images of the thermal field in the heated region and its immediate vicinity are shown. The results of calculations of electrical parameters of required for heating electrical equipment, and changes in these parameters over time as heating, is given.

Key words: Coal, breakdown, heating, carbonization, gas.

Introduction. Researchers offer a number of ways for heating the coal directly underground. The most common is the underground gasification due to incomplete combustion of coal [1-3]. According to this technology, an oxidant, which is mainly air or a vapor-air mixture, is injected into the underground reactor. A set of oxidative and reducing reactions produce a gas with a calorific value of 4–8 MJ/m³, which contains the hydrogen and carbon monoxide as main combustible components [1].

The limitations of this method include the high content of non-combustible components in the gas, mainly nitrogen and carbon dioxide. As a result, the gas produced has a low calorific value, and thus a narrow field of application. The main product of this technology is gas. Coal tar is formed in small quantities and is not used as a product.

Another approach is the heating using the outside heat, for example, from an electric heater. If we place the heaters directly in the wells, it will be possible to heat only that part of the coal that is removed from the well by no more than 2-3 meters. Heating of a more remote zone requires more time (more than six months) due to the low thermal conductivity of coal.

To eliminate this drawback, the heating element should be extended along the length of the bed. One of the known solutions is as follows. A fracture channel should be created between two wells and filled with granules of an electrically conductive substance, for example, graphite. Further, the formed current path is used as an electric heater [4,5].

Research methodology. We propose a method that is similar to the one described above, however, it eliminates a large number of expensive and complex preparatory operations. To pass a current through a section of the reservoir, the method requires two wells with electrodes (figure 1).

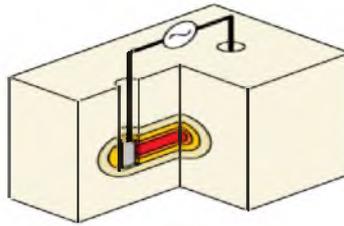


Figure 1 – Plan of subterranean heating method

An electric current causes the release of Joule heat in the coal:

$$Q(t) = \int_0^t U(t)I(t)dt = \int_0^t \frac{U^2(t)}{R(t)} dt, \quad (1)$$

where Q - is the thermal energy, I - is the current, U - is the voltage on the electrodes, R - is the resistivity of interelectrode space, t - is exposure time.

The specific electrical resistance of coal is 10^{10} - 10^{12} Ohm·cm that is relatively large [6-10]. Thus, a very high voltage will be required to provide the power release enough for heating. However, a decrease in the interelectrode resistance can be achieved by creating a breakdown channel. The breakdown channel is formed from the substance of coal modified by plasma of electrical discharges. As a result of pyrolysis under the action of high plasma temperature, the resistance of the coal decreases. It is known that in the temperature range of 350-500°C without air access, the coal substance carbonizes, as a result, its electrical resistance decreases to 10 - 10^2 Ohm·cm [6-9]. Due to this, the channel has a low resistance that is sufficient to pass current at a technically feasible voltage value.

To assess the effectiveness of the method, it is necessary to calculate the required voltage and power of the aboveground electrical equipment, as well as the achievable heating rate. The article describes mathematical simulation in order to determine the temperature dynamic in the vicinity of the channel, and to calculate the required technical characteristics of the aboveground power supply.

Thermochemical conversion of coal without access of external reagents

When coal is heated, the organic mass undergoes changes occurring under the action of temperature. In the range from the initial temperature to 120°C, the moisture is released, which is contained in the coal in both free and ion-bound form. Upon further heating from 120°C to 300°C, predominantly ion-bound and pyrogenic moisture is released. Further, in the range from 300°C to 550°C, solid organic compounds decompose with the formation of liquid and gaseous hydrocarbons. The residue from the decomposition reactions is coke or amorphous carbon. Due to the appearance of coke, the electrical resistance of coal is reduced. At temperatures above 550°C, secondary reactions of liquid and gaseous hydrocarbons with solid carbon occur. The products of these reactions are hydrogen and carbon monoxide.

Initial data for the heating calculation

Suppose that there are two wells drilled from the surface to the underground coal seam and located at a distance d from each other. The wells contain an electrodes placed at the bottom and connected by cables to an aboveground source of electrical energy. Electrodes are electrically connected to each other due to an electrothermal breakdown channel. The channel will operate as an electrical heating element, heating the subterranean formation. Let us consider the heating process.

The power of electric heating released in the reservoir will be spent on the heating of the surrounding space and thermochemical reactions. In addition, part of the thermal energy will be dispersed into the surrounding space. Thus, the heat balance of heating is as follows:

$$Q_r = Q_h + Q_{ch} + Q_s \quad (2)$$

where Q_r - is released heating energy, Q_h - is the energy spent on the heating of the rock, Q_{ch} - is the energy spent on thermochemical transformations, Q_s - is the energy dispersed into the surrounding space due to thermal conductivity.

Heat source

The heat source is an electrothermal breakdown channel. Heating starts from the moment when the electric discharge structures developing in the coal close the interelectrode gap [11]. At the time of the

formation of the through conductive channel, its diameter is very small compared with the interelectrode distance. Usually, it is not more than 0.1 mm [12,13]. The channel can be simply represented as a straight line connecting the electrodes. In this case, the heating source is a cylinder having electrical resistance:

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{d}{S} = \frac{4d}{\sigma \pi D^2}, \quad (3)$$

where R - is channel electrical resistance, d - is the channel length, σ - is electrical conductivity of carbonized coal, D - is the channel diameter. The channel consists of a coal substance after pyrolysis. The resistivity of this substance is about 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ for the considered coal. As the area around the channel heats up, the coal in it also undergoes pyrolysis. Its resistance also decreases, thus conductive channel expands (figure 1).

The power released during heating can be mathematically written with the expression:

$$W_r = \sigma E^2, \quad (4)$$

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2, \quad (5)$$

where E - is modulus of the electric field vector, E_x, E_y, E_z - are its projections in three dimensions.

Heat absorption

As we can see from the heat balance equation (1), heat is used to heat the coal substance, as well as to thermochemical transformations. The component responsible for the heat of thermochemical transformations can be either positive or negative, depending on the balance of exothermic and endothermic reactions. In different temperature ranges, the pyrolysis heat flux can be positive or negative. On average, however, endothermic reactions dominate, so part of the heat is absorbed. The physical heat capacity of coal, without taking into account thermochemical reactions, also depends on temperature. It is not possible to determine the temperature dependence of the heat capacity of coal without taking into account the energy of thermochemical transformations. Therefore, the researchers more often use the effective heat capacity, i.e. heat capacity taking into account energy absorption at thermochemical transformations. Our calculations used the temperature dependence of the effective heat capacity, the analytical form of which is approximated in the temperature range according to a polynomial function.

Heat dispersion

Initially, the subterranean formation has some initial temperature. If we heat a part of the reservoir, some of the heat will be distributed to less heated surrounding areas due to heat conduction and mass transfer. Since coal is not transparent in the infrared, there is no heat transfer due to radiation. Presumably, the main heat sink will occur due to thermal conductivity, therefore mass transfer in the model is not taken into account.

The evolution of the temperature field is taken from the solution of the three-dimensional heat conduction task, which includes the heat conduction equation:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(E) \quad (6)$$

where T - is temperature, t - is time, x, y, z - are spatial coordinates; c - is the heat capacity, ρ - is the density, λ - is the heat conductivity, $W(E)$ - is a source of heat.

We used a coefficient η as a measure of the change in the electrophysical and thermal characteristics of coal that occur as it heats. It is called the degree of conversion, and changing from 0 to 1 as the coal heats up. A value of 1 means that the coal in this area is fully pyrolyzed and has the highest electrical conductivity.

Heating conditions

The initial heating conditions are defined as follows:

$$t = 0: T_0 = 0, \eta = 0.$$

Taking into account the experimental and literature data for the coals of Kazakhstan, the following averaged parameter values were adopted:

$\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$, the values of thermal conductivity and heat capacity are defined analytically in the form of a polynomial approximation with the temperature:

$$\lambda = k_0 + k_1T + k_2T^2 + k_3T^3 + k_4T^4 + k_5T^5 \tag{7}$$

$$c = k_0 + k_1T + k_2T^2 + k_3T^3 \tag{8}$$

The values of the coefficients are given in the following table:

The value of the coefficients for heat capacity and thermal conductivity

	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
c	$1,379 \cdot 10^3$	-11,763	0,145	$-3,964 \cdot 10^{-4}$	-	-
λ	1,566	-0,064	$1,215 \cdot 10^{-3}$	$-1,062 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-8}$	$-6,927 \cdot 10^{-11}$

The dependence of resistivity on temperature is approximated by the function:

$$\rho = k_0 \exp(k_0T) \tag{9}$$

where $k_0 = 1,73968 \cdot 10^{11}$, $k_1 = -0,04647$.

The calculation was carried out using an implicit splitting scheme and coordinate-wise marching.

Results and its discussion. The calculations were carried out for an interelectrode distance of 0.5 m. Figure 2 shows the dependence of the temperature at the center of the interelectrode gap on the heating time. In this case, the constant heating power mode was used.

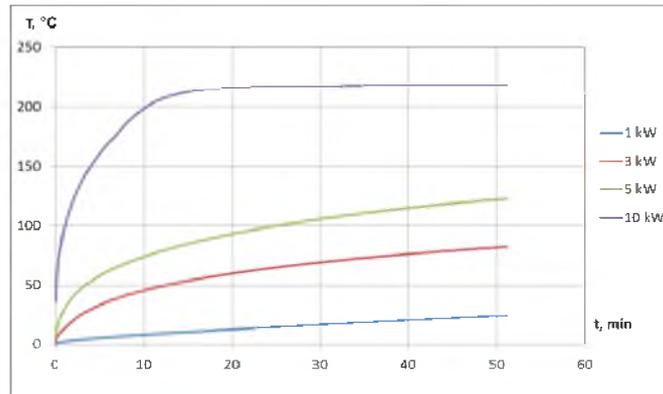


Figure 2 – Temperature in the center of the interelectrode gap at different values of the released power

Initially, the heating is intense, then, when the temperature near the electrodes becomes high, the heating slows down due to the outflow of heat into the surrounding space.

In addition to temperature in the interelectrode space, the efficiency of the technology is also affected by the distribution of thermal energy in the vicinity of the electrodes. Figure 3 shows images of the thermal field in the computational domain at different times with a heating power of 3 kW.

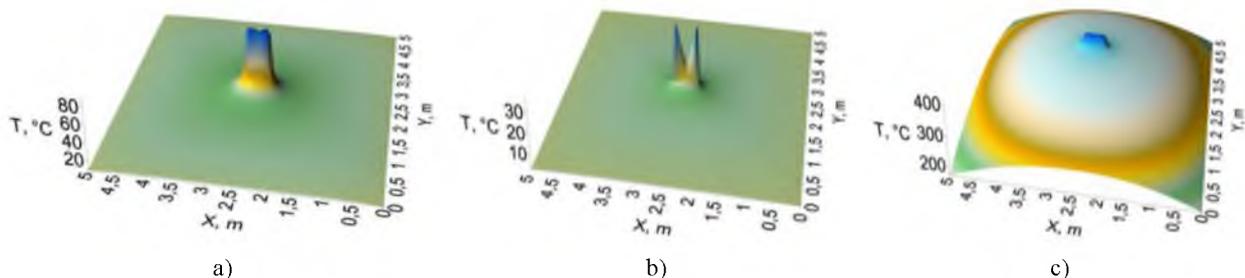


Figure 3 – Thermal field in the calculation plane at time points: (a) 5 minutes, (b) 30 minutes, (c) 10 hours.

The most notable are the following features. At the beginning of heating, the temperature increases sharply in close proximity to the electrodes. Next, the interelectrode space is heated, while the surrounding areas are weakly heated. After a longer time, the thermal energy begins to be distributed in the direction away from the electrodes, heating the area within a radius of several meters.

Preparation of technology field tests requires the values of the technical parameters of aboveground electrical equipment. Using the values of the initial and final (before and after pyrolysis) resistances of coal and calculation of the conversion degree, we can determine the change in interelectrode resistance as it heats up. Results for the interelectrode distance of 0.5 m are shown in figure 4a. Using the known resistance value, we can determine the required values of voltage and current. The calculation results for the fixed power mode of 3 kW are shown in figure 4b and c.

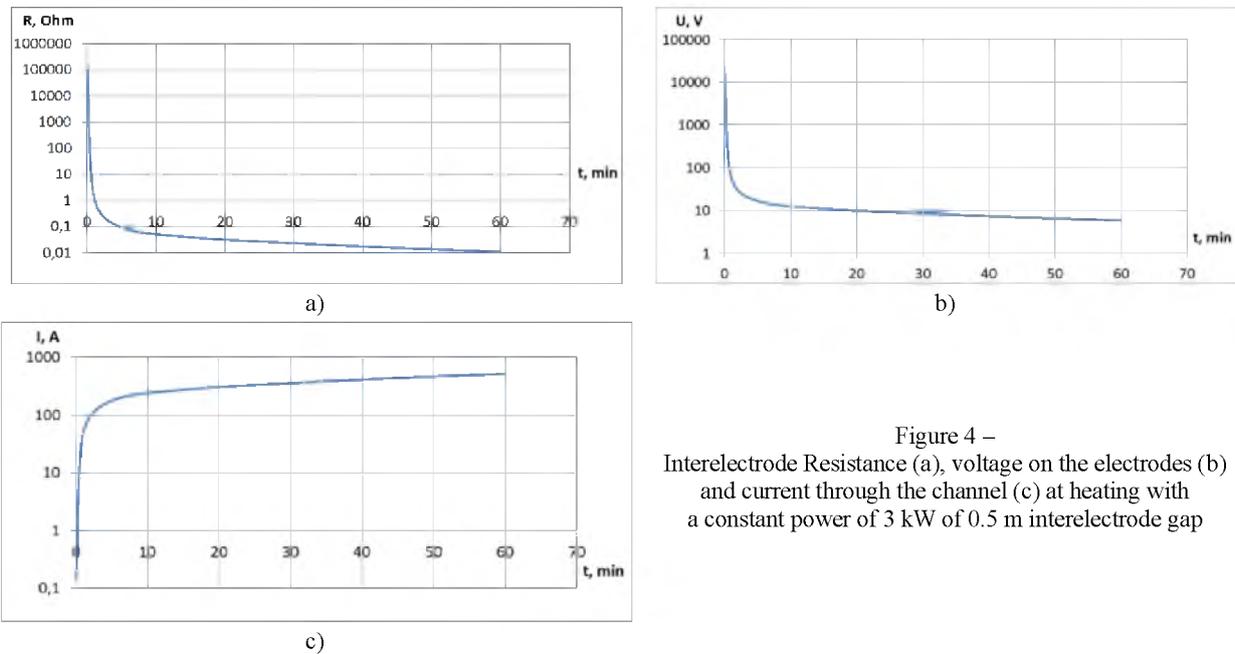


Figure 4 – Interelectrode Resistance (a), voltage on the electrodes (b) and current through the channel (c) at heating with a constant power of 3 kW of 0.5 m interelectrode gap

Thus, the results obtained can be used as a guide for the field equipment development. According to calculations, a voltage of about 22 kV will be required to initiate heating. As interelectrode gap is heated, the resistance will decrease. In accordance with the decrease in resistance, the voltage should be reduced and the current should be increased in order to maintain the power at a constant level [14,15]. Within an hour, the resistance decreases to less than 1 Ohm, so the given heating mode requires the current of about 500 A.

The considered model has a number of limitations. The model does not take into account the following factors that occur when a real underground formation is heated:

- the change in thermal conductivity due to cracking;
- the mass transfer;
- the dielectric and thermal properties of coal are assumed to be isotropic, although due to the layered structure, the thermal conductivity and electrical conductivity are likely anisotropic.

However, since the purpose of modeling is to estimate the first approximation of heating parameters, we suppose that these assumptions are justified.

Conclusion. The results of the calculations show the possibility of reaching of the pyrolysis temperature in the vicinity of the electrodes over a period of one hour, with heating power in few kilowatt and an interelectrode distance of 0.5 m. At the initial stage of heating, the temperature increases only in the immediate vicinity of the electrodes. In the next few hours, the area that is several meters away from the electrodes is heated. The initial resistance of the interelectrode area is large; it requires the voltage of tens of kilovolts to release the power enough for heating. During the first hour of heating, the resistance of the channel is significantly reduced, and maintaining heating requires passing a current of hundreds of amperes.

Acknowledgements. This work was carried out as part of the scientific and technical program No. IRN BR05236359 “Scientific and technological support for coal processing and production of high-value coal products” and project No. IRN AP05131004 “Development of technology for underground gasification of coals of Ekibastuz and Maikuben basins and the creation of experimental industrial equipment”.

Ж. М. Касенова¹, Б. Т. Ермағамбет¹, Г. Е. Ремнев²,
С. М. Мартемьянов², А. А. Бухаркин², Н. У. Нурғалиев¹

¹«Көмір химиясы және технология институты» ЖШС, Нұр-Сұлтан, Қазақстан;

²Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

ЭЛЕКТРОЖЫЛУЛЫҚ ТЕСУ АРНАСЫНДА КӨМІРДІ ТОКПЕН ЖЕР АСТЫНДА ҚЫЗДЫРУДЫ МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Көмірдің жер асты қабатының электр жылуын тесу арнасы арқылы өтетін электр тогымен қыздыруды сипаттайтын математикалық үлгі жасалған. Жылу көзі болатын тесу арнасы жер асты қабатының ішінде ұңғымаларда орналасқан екі электродтың арасында қалыптасады. Электродтар жер бетіндегі электр жабдығына кабельдермен қосылған. Электржылулық тесу каналы қалыптасу кезінде диаметрі аз болады және канал маңайындағы көмірдің қызуы мен карбонизациясы кезінде кеңейтіледі. Электродтар арасындағы қашықтықтың шамасы 0,5 метрге тең. Диэлектрлік және жылуфизикалық қасиеттерінің мәндері Қазақстан Республикасының көміріне арналған эксперименталды және әдеби деректер негізінде алынған. Қабаттың қыздырылатын учаскесінің ортасындағы температураның әртүрлі қыздыру қуатында уақыттың тәуелділігі алынды. Жылыту аймағында және оның жақын маңайындағы жылу өрісінің бейнесі алынды. Электр жабдықтардың қыздыру үшін талап етілетін электрлік параметрлердің есептеу мәндері және осы параметрлердің қыздыру шамасына қарай уақыттың өзгеру нәтижелері келтірілген. Бастапқыда жерасты қабатының өзіндік температурасы болады. Егер біз пласт аймағын жылытатын болсақ, жылу энергиясының бір бөлігі жылу өткізгіштігі мен масса тасмалдау есебінен азырақ қыздырылған қоршаған аймақтарға тарайды. Көмір инфрақызыл диапазонында мөлдір емес болғандықтан, сәулелену есебінен жылу беру болмайды. Негізгі жылу беру жылу өткізгіштігі есебінен жүргізілетіндіктен, модельдегі масса тасмалдау ескерілмеген. Көмірді қыздыру кезінде органикалық масса температураның әсерінен болатын өзгерістерге ұшырайды. Бастапқы температурадан 120 °С-қа дейінгі диапазонда бос күйінде және ионды-байланысқан түрде көмірде болатын ылғалдың шығуы орын алады. Одан әрі 120 °С-тан 300 °С-қа дейін қыздырғанда, көбірек ионды-байланысқан және пирогенді болып шығады. Одан әрі 300 °С-тан 550 °С-қа дейінгі диапазонда сұйық және газ тәрізді көмірсутектердің пайда бола жүретін қатты органикалық қосылыстары ыдырайды. Ыдырау реакцияларының қалдығы – кокс-аморфты көміртек. Кокстың пайда болуы есебінен көмірдің электрлік кедергісі төмендейді. 550 °С-қа жоғары температураларда қатты көмірдің сұйық және газ тәрізді көмірсутектердегі екіншілік реакциялары жүреді. Бұл реакциялардың өнімдері – газ тәрізді сутек және көміртек монооксиді. Жылулық баланс теңдеуінен, жылу шығыны көмір затының қызуына, сондай-ақ термохимиялық айналуға жұмсалатындығын көре аламыз. Термохимиялық айналулар жылуына жауапты компонент экзотермиялық және эндотермиялық реакциялардың балансына байланысты оң да, теріс те болуы мүмкін. Бұл термогравиметриялық анализдің жылу ағынының қисығынан байқалады. Әртүрлі температура диапазонында пиролиздің жылу ағыны оң немесе теріс болуы мүмкін. Дегенмен, орта есеппен эндотермиялық реакциялар басымырақ, сондықтан жылу бөлігі жұтылады. Термохимиялық реакцияларды есепке алмағанда, көмірдің физикалық жылу сыйымдылығы да температураға байланысты. Термохимиялық айналулар энергиясын есепке алмай, көмірдің жылу сыйымдылығының температуралық тәуелділігін анықтау мүмкін емес. Сондықтан тиімді жылу сыйымдылығын, яғни термохимиялық айналуға сіңірілген энергия есепке алынған жылу сыйымдылығын жиі қолданады. Есептерде аналитикалық формасы полиномиалды функция бойынша температуралық диапазонда аппроксимацияланған тиімді жылу сыйымдылығы қолданылды. Электрод аралық кеңістік температурасынан басқа, технология тиімділігіне электродтардың маңайындағы жылу энергиясының таралуы әсер етеді. 3 кВт қыздыру қуатында әртүрлі уақыт мезетінде есептік аймақтағы жылу өрісінің бейнелері көрсетілген. Келесі ерекшеліктер ең жақсы сипаттаманы береді. Қыздыру басталғанда, электродтарға тікелей жақын аймақтарда температура күрт өседі. Одан әрі электрод аралық кеңістіктің қызуы орын алады, ал қоршаған аймақтар әлсіз қызады. Біраз уақыт өткеннен кейін жылу энергиясы электродтардың бағыты бойынша тарала бастайды. Осылайша, бірнеше метр радиустағы аймақ қызады.

Технологияны табиғи сынақтарға дайындау қыздыруға қажетті жабдықтардың талап етілетін техникалық параметрлерін білуді міндеттейді. Көмірдің бастапқы және соңғы (пиролизге дейін және одан кейін) кедергілерінің белгілі шамалары бойынша, сондай-ақ айналу дәрежесін есептей отырып, электрод аралық кедергінің қыздыруға қарай өзгеруін анықтай аламыз. Электрод аралық қашықтық 0,5 м болғандағы нәтижелер суретте көрсетілген.

Түйін сөздер: көмір, тесу, қыздыру, карбонизация, газ.

Ж. М. Касенова¹, Б. Т. Ермагамбет¹, Г. Е. Ремнев²,
С. М. Мартемьянов², А. А. Бухаркин², Н. У. Нургалiev¹

¹ТОО « Институт химии угля и технологии», Нур-Султан, Казахстан;

²Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНОГО НАГРЕВА УГЛЕЙ ТОКОМ В КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛООВОГО ПРОБОЯ

Аннотация. Построена математическая модель, описывающая нагрев подземного пласта угля электрическим током, протекающим через канал электротеплового пробоя. Канал пробоя, являющийся источником тепла, формируется между двумя электродами, расположенными в скважинах внутри подземного пласта. Электроды подключены кабелями к наземному электрооборудованию. Канал электротеплового пробоя в момент формирования имеет малый диаметр и расширяется по мере нагрева и карбонизации угля в окрестности канала. Величина расстояния между электродами задана равной 0,5 метра. Значения диэлектрических и теплофизических свойств взяты на основании экспериментальных и литературных данных для углей Казахстана. Получены зависимости температуры в центре нагреваемого участка пласта от времени при разной мощности нагрева. Получены изображения теплового поля в нагреваемой области и ее ближайшей окрестности. Приведены результаты расчетов электрических параметров электрооборудования, требуемого для нагрева, и изменения этих параметров во времени по мере нагрева. Изначально подземный пласт имеет некоторую исходную температуру. Если мы нагреваем участок пласта, часть тепловой энергии будет распространяться в менее нагретые окружающие области за счет теплопроводности и массопереноса. Поскольку уголь не прозрачен в инфракрасном диапазоне, теплопередача за счет излучения отсутствует. Предположительно, основной теплоотвод будет происходить за счет теплопроводности, поэтому массоперенос в модели не учтен. При нагреве угля органическая масса претерпевает изменения, происходящие под действием температуры. В диапазоне от исходной температуры до 120°C происходит выход влаги, которая содержится в угле как в свободном, так и в ионно-связанном виде. При дальнейшем нагреве от 120°C до 300°C выходит преимущественно ионно-связанная и пирогенетическая влага. Далее в диапазоне от 300°C до 550°C происходит разложение твердых органических соединений с образованием жидких и газообразных углеводородов. Остатком от реакций распада является кокс – аморфный углерод. За счет появления кокса снижается электрическое сопротивление угля. При температурах выше 550°C происходят вторичные реакции жидких и газообразных углеводородов с твердым углеродом. Продуктами этих реакций являются газообразный водород и монооксид углерода. Как видно из уравнения теплового баланса, расходование тепла происходит на нагрев угольного вещества, а также на термохимические превращения. Компонент, отвечающий за теплоту термохимических превращений, может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от баланса экзотермических и эндотермических реакций. Это видно по кривой теплового потока термогравиметрического анализа. В разных диапазонах температур тепловой поток пиролиза может быть положительным или отрицательным. В среднем, однако же, доминируют эндотермические реакции, таким образом, часть тепла поглощается. Физическая теплоемкость угля без учета термохимических реакций также зависит от температуры. Определить температурную зависимость теплоемкости угля без учета энергии термохимических превращений не представляется возможным. Поэтому чаще используют эффективную теплоемкость, т.е. теплоемкость с учетом поглощения энергии на термохимические превращения. В расчетах использована эффективная теплоемкость, аналитическая форма которой аппроксимирована в температурном диапазоне по полиномиальной функции. Кроме температуры в межэлектродном пространстве, на эффективность технологии влияет также распределение тепловой энергии в окрестности электродов. Показаны изображения теплового поля в расчетной области в разные моменты времени при мощности нагрева 3кВт.

Наиболее характерными являются следующие особенности. В начале нагрева температура резко возрастает в непосредственной близости с электродами. Далее происходит прогрев межэлектродного пространства, при этом окружающие области нагреваются слабо. Спустя более продолжительное время тепловая энергия начинает распределяться по направлению от электродов, прогревая таким образом область в радиусе нескольких метров. Подготовка натуральных испытаний технологии требует знания требуемых технических параметров оборудования для нагрева. По известным величинам начального и конечного (до и после пиролиза) сопротивлений угля, а также рассчитав степень превращения, можем определить изменение межэлектродного сопротивления по мере нагрева. Результаты для межэлектродного расстояния 0,5 м приведены на рисунках.

Ключевые слова: уголь, пробой, нагрев, карбонизация, газ.

Information about the authors:

Kassenova Zhanar Muratbekovna, Master of Chemical Sciences and Technology, Deputy Director of LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", Nur-Sultan, Kazakhstan; zhanar_k_68@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9497-7319>

Yermagambet Bolat Toleukhanuly, Doctor of Chemical Science, Professor, Director of LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", Nur-Sultan, Kazakhstan; bake.yer@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1556-9526>

Remnev Gennadiy Efimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia; remnev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1654-3179>

Martemyanov Sergey Mikhaylovich, Candidate of Technical Science, Associate professor, Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia; martemyanov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5372-6276>

Bukharkin Andrey Andreevich, Master of Technic and Technology, engineer, Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia; ater@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6877-1595>

Nurgaliyev Nurken Uteuovich, Leading Researcher of LLP "Institute of Coal Chemistry and Technology", Candidate of Chemical Science; nurgaliev_ao@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9171-2238>

REFERENCES

[1] Perkins G. (2018) Underground coal gasification – Part I: Field demonstrations and process performance // *Progress in Energy and Combustion Science*, 67: 158-187. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.02.004 (in Eng.).

[2] Perkins G. (2018) Underground coal gasification–Part II: Fundamental phenomena and modeling // *Progress in Energy and Combustion Science*, 67: 234-274. DOI: 10.1016/j.pecs.2018.03.002 (in Eng.).

[3] Blinderman M.S., Klimenko A.Y. (2017) *Underground coal gasification and combustion*. Woodhead Publishing, England. ISBN: 978-0-08-100313-8

[4] Symington, W.A., Burns J.S., El-Rabaa W., Otten G.A., Pokutyłowicz N., Spiecker P.M., Williamson R.W., Yeakel J.D. (2009) Field testing of Electrofrac™ process elements at ExxonMobil's Colony Mine. 29th Oil Shale Symposium, Golden, USA. P. 126-159.

[5] Symington W.A., Kaminsky R.D., Meurer W.P., Otten G.A., Thomas M.M., Yeakel J.D. (2010) ExxonMobil's Electrofrac™ Process for In Situ Oil Shale Conversion, ACS Symposium Series, 1032: 185-216. DOI: 10.1021/bk-2010-1032.ch010 (in Eng.).

[6] Duba A.G. (1977) Electrical conductivity of coal and coal char, *Fuel*, 56 (4): 441-443. DOI: 10.1016/0016-2361(77)90074-6 (in Eng.).

[7] Balanis C.A., Jeffrey J.L., Yoon Y.K. (1978) Electrical properties of eastern bituminous coal as a function of frequency, polarization and direction of the electromagnetic wave, and temperature of the sample, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 16 (4): 316-323. DOI: 10.1109/TGE.1978.294591 (in Eng.).

[8] Celzard A., Mareche J.F., Payot F., Begin D., Furdin G. (2000) Electrical conductivity of anthracites as a function of heat treatment temperature, *Carbon*, 38 (8): 1207-1215. DOI: 10.1016/S0008-6223(99)00246-8 (in Eng.).

[9] Shao Zh., Wang D., Wang Y., Zhong X., Tang X., Xi D. (2016) Electrical resistivity of coal-bearing rocks under high temperature and the detection of coal fires using electrical resistance tomography, *Geophysical Journal International*, 204 (2): 1316-1331. DOI: 10.1093/gji/ggv525 (in Eng.).

[10] Ermagambet B.T., Martemyanov S.M., Kassenova Zh.M., Remnev G.E., Bukharin A.A., Nurgaliyev N.U. (2018) Dielectric properties of the coals of maykuben and ekibastuz basins, *News of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Series of geological and technical sciences*, 6 (432): 38-45. DOI: 10.32014/2018.2518-1491.24 (in Eng.).

[11] Bukharkin A.A., Martemyanov S.M., Lopatin V.V., Koryashov I.A. (2014) Electrical discharge phenomena application for solid fossil fuels in-situ conversion, *Journal of Physics, Conference Series*, 552: 012012. (in Eng.).

[12] Champion J.V., Dodd S.J., Alison J.M. (1996) The correlation between the partial discharge behaviour and the spatial and temporal development of electrical trees grown in an epoxy resin, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29 (10): 2689 (in Eng.).

[13] Vogelsang R., Farr T., Fruth B., Frohlich K. (2005) Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements. 15th International Conference on Electrical Machines, Brügge, Belgium. P. 271-284 (in Eng.).

[14] Kasenova Zh.M., Ermagambet B.T., Remnev G.E., Martemyanov S.M., Bukharkin A.A., Nurgaliyev N.U. (2019) Modeling of subterranean heating of coals of maykuben and ekibastuz basins, *News of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Series of geological and technical sciences*, 6 (438): 70-76. DOI: 10.32014/2019.2518-170X.157 (in Eng.).

[15] Baybatsha A.B., Supin Pen, Satibekova S.B. Evaluation of the physical and mechanical properties of rocks by the degree of coal metamorphism (2019) // *News of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Series of geological and technical sciences*. 2019. Vol. 1. 433. P. 187-194. DOI: 10.32014/2019.2518-170X.23 (in Russ.).