

УДК 004.942

Ташполотов Ысламидин

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник,
Институт природных ресурсов Южного отделения Национальной академии наук
Кыргызской Республики; Ошский государственный университет
e-mail: itashpolonov@mail

Ташполотов Ысламидин

Ф.-м.и.д., профессор
Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Түштүк бөлүмүнүн
Жаратылыш байлыктары институту; Ош мамлекеттик университети,
e-mail: itashpolonov@mail.ru, +(996)555260554

Tashpolotov Yslamydin

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher,
Institute of natural resources in the southern branch of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic; Osh State University

Тажикбаева Санайым Тойгонбаевна,

улук окутуучу, Ош мамлекеттик университети,
tsonaym@mail.ru

Тажикбаева Санайым Тойгонбаевна,

старший преподаватель,
Ошский государственный университет,
tsonaym@mail.ru,

Tazhikbaeva Sanaiym Toigonbaevna,

senior teacher,
Osh state university,
tsonaym@mail.ru

**СУУ-КӨМҮР ОТУНУНУН БӨЛҮКЧӨСҮНҮН КҮЙҮШҮНҮН МАТЕМАТИКАЛЫК
МОДЕЛИН ИШТЕП ЧЫГУУ ЖАНА АНАЛИЗДӨӨ**

Аннотация. Бул макалада көмүрдү колдонуунун натыйжалуулугун жогорулатуунун багыттарынын бири болгон суу-көмүр отуну каралды. Суу-көмүр отунунун күйүү процесси тиешелүү стадияларга бөлүнүп изилденди. Күйүү процессинин 1-стадиясы болгон – “Суу бууланып баштаганга чейинки жылытуу” маселесин чечүү “Чектүү айырмалар” усулунун жардамында Python программалоо тилинде автоматташтырылды. Сандык усулдун негизинде алынган жыйынтыктар эксперименталдык жыйынтыктар менен салыштырылды жана анализденди.

Негизги сөздөр: суу-көмүр отуну, суу-көмүр отунунун бөлүкчөсүнүн күйүшү, суу-көмүр отунунун бөлүкчөсүнүн күйүшүнүн математикалык модели, Python программалоо тили, “Чектүү айырмалар” усулу

**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Аннотация. В данной статье рассмотрено водоугольное топливо, которое является одним из путей повышения эффективности использования угля. Процесс сгорания частицы водоугольного топлива был разделен на соответствующие стадии. Решение

задачи 1-й стадии процесса горения - «Нагрев до испарения воды» автоматизировано с использованием метода конечных разностей на языке программирования Python. Результаты, полученные численным методом, сравнивались с экспериментальными и анализировались.

Ключевые слова: водоугольное топливо, горение частицы водоугольного топлива, математическая модель сгорания частицы водоугольного топлива, язык программирования Python, метод конечных разностей.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A MATHEMATICAL MODEL OF COMBUSTION OF COAL-WATER FUEL PARTICLES

Abstract. This article discusses coal-water fuel, which is one of the ways to increase the efficiency of coal use. The combustion process of a coal-water fuel particle was divided into appropriate stages. The solution to the problem of the 1st stage of the combustion process - "Heating until water evaporates" is automated using the finite difference method in the Python programming language. The results obtained by the numerical method were compared with the experimental ones and analyzed.

Key words: coal-water fuel, combustion of a coal-water fuel particle, mathematical model of combustion of a coal-water fuel particle, Python programming language, finite difference method.

Киришүү. Жаратылыш ресурстарын максаттуу колдонуу жана ресурстарды үнөмдөөнүн технологияларын түзүү маселелери барган сайын актуалдуу болуп барат. Көмүрдү натыйжалуу пайдалануу маселесинин алгылыктуу технологиялык чечимдеринин бири катары - суу-көмүр отунун (СКО) иштеп чыгууну айтууга болот.

Суу-көмүр отуну бул – отундун гомогендик структурасын сактаган көмүрдөн (салмак боюнча 50-69%), суудан (30-49%) жана реагент-пластификаторлордон (1% чейин) турган жогорку концентрациялуу суспензия болуп саналат [1].

СКОнун тарыхы XX кылымдын 60-жылдарынан башталганына карабастан, бүгүнкү күнү анын күйүшүнүн физикалык механизмдерин аныктоого жана математикалык моделдештирүүгө багытталган изилдөө иштеринде көптөгөн актуалдуу маселелер бар [2]. Бул маселелердин келип чыгышы бөлүкчөлөрдүн ири көптүгүнүн күйүү процессин моделдөөнүн өзгөчөлүктөрү менен байланышкан. Мында жок дегенде бир бөлүкчөнүн күйүшүнүн закон ченемдүүлүгүн аныктап, аны калган бөлүкчөлөргө жалпылоо зарыл болот.

Окумуштуулардын жүргүзгөн эксперименталдык жана теориялык изилдөөлөрүнүн жыйынтыктары боюнча СКОнун күйүү процессин өз-ара байланышкан бир нече стадияларга бөлүп алып, алардын ар бирин жекече изилдөө максатка ылайыктуу. Күйүү процессинин негизги стадияларын төмөнкүчө бөлүп кароого болот: суу бууланып баштаганга чейинки жылытуу, нымдуулуктун бууланышы, газ сымал заттардын бөлүнүп чыгышы жана көмүртектүү катуу заттардын пайда болушу менен коштолгон СКОнун органикалык компоненттеринин термикалык ажыроосу, акыркы заттардын суу буусу менен өз-ара аракеттениши, сырткы чөйрөдө термикалык ажыралыштын продуктуларынын кычкылданышы [3].

Изилдөөлөргө таянсак, 1-стадия $\sim 110^{\circ}\text{C}$ температурада аяктайт. 900°C температурадагы күйүү чөйрөсүндө жайгашкан, диаметри 1500 мкм болгон СКОнун бөлүкчөсү үчүн сандык изилдөөдө төмөнкү параметрлер эсептелинген: жылытуу стадиясы 1с. кийин аяктаган, буулануу стадиясы 3,5 секундга чейин созулган, 3-стадия болжолдуу 8с. уланган, кокстук калдыктардын күйүшү менен жыйынтыктоочу этап аяктап, жалпы процесстин жүрүшү болжолдуу түрдө 43 секундду түзгөн.

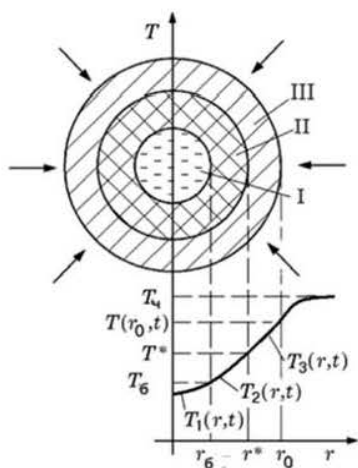
Ал эми суунун СКОнун бөлүкчөсүнүн тутануу жана күйүү процессине өтө орчундуу таасирин тийгизери такталган [4]. СКОнун бөлүкчөсүнүн бетинде суунун бууланышынын жыйынтыгында жогорку термикалык каршылыкка ээ болгон көзөнөктүү көмүр каркасы пайда болот. Натыйжада, СКОнун бөлүкчөсүндө температуранын өсүшү кадимки көмүр отунуна караганда бир топ тезирээк жүрөт. Буулануунун негизинде пайда болгон суу буулары көзөнөктүү каркас аркылуу филтрленишет. Тиешелүү түрдө түздөн-түз буулануу фронтунун жанында бөлүкчөдө жогорку басым зонасы калыптанат. Мында буунун температурасы да орточо эсеп менен $10 - 20^{\circ}\text{C}$ чейин жогорулайт. СКОнун катмарындагы суунун көп болушу анын бууланышы үчүн энергиянын сарпталышын жогорулатат.

Жогорку температурадагы суу буусу активдүү кычкылдандыргыч да боло алышы мүмкүн. Мында, анын ролу көмүртек менен суу буусунун өз-ара аракеттенүү реакциялары менен гана чектелип калбайт. Жетиштүү жогорку температурада (1000°C дан жогору) газдаштыруунун жана термикалык ажыралыштын продуктулары менен болгон термохимиялык реакциялар жүрүшү мүмкүн. Мындай реакциялар, эреже катары, активдештирүүнүн азыраак энергиясына ээ болот. Натыйжада, суунун жогорку концентрациясында СКОнун бөлүкчөсүнүн бир топ тезирээк күйүшүнө шарт жаралат.

СКОнун бөлүкчөсүнүн күйүшү боюнча аткарылган жумуштарга берилген кыскача анализден соң, күйүү процессинин негизги стадияларын мүмкүн болушунча кененирээк изилдөө зарыл экендигине ынанамыз.

Жумушту аткаруунун максаты: негизги факторлорду жана процесстерди эске алуу менен физикалык моделдин чегинде суу-көмүр отунунун бөлүкчөсүнүн күйүү маселесин чечүү.

Маселенин математикалык коюлушу. СКОнун бөлүкчөсүнүн күйүү камерасында күйүшүнүн схемасын шарттуу түрдө 1 – сүрөт аркылуу көрсөтүүгө мүмкүн. Бул физикалык модель СКОнун бөлүкчөсүнүн күйүшүнүн математикалык моделин түзүүгө мүмкүнчүлүк жаратат. Мында СКОнун бөлүкчөсү сфера формасында жана көп катмарлуу структурага ээ деп алынат.



1-сүрөт. Суу-көмүр отунунун бөлүкчөсүнүн күйүшү:

I – нымдуу отун жайгашкан аймак, II – кургак отун жайгашкан аймак, III – термикалык ажыралышка ээ болгон кургак көмүр жайгашкан аймак.

Жалпы учурда СКОнун бөлүкчөсү тешикчелери суу менен толтурулган көп компоненттүү көзөнөктүү структураны (суу, органикалык бөлүгү, минералдык бөлүгү) билдирет.

Жогоруда берилген физикалык моделге туура келген “СКОнун бөлүкчөсү – жогорку температурадагы чөйрө” системасы үчүн стационардык эмес жекече туундулуу дифференциалдык теңдемелердин системасы төмөнкү көрүнүшкө ээ:

- отундун учурдагы (нымдуу) бөлүгү үчүн энергиянын теңдемеси [5]:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = \lambda_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right],$$

$$t > 0, 0 < r < r_6, T \leq T_6, \quad (1)$$

- СКОнун “суусузландырылган” бөлүгү үчүн энергиянын теңдемеси:

$$c_2(r) \rho_2(r) \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial t} = \lambda_2(r) \left[\frac{\partial^2 T_2(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \right] \pm \sum Q_i W_i - u_s C_{p,s} \rho_s \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r},$$

$$t > 0, r_6 < r < r_0, T \geq T_6, \quad (2)$$

- отундун органикалык бөлүгү үчүн химиялык кинетиканын теңдемеси [6]:

$$\frac{\partial \eta_2(r, t)}{\partial t} = (1 - \eta_2(r, t)) k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_1(r, t)}\right),$$

$$t > 0, r_6 < r < r_0, T \geq T_6, \quad (3)$$

- термикалык ажыралыштагы суу буусу жана газ сымал продуктулар үчүн фильтрлөө теңдемеси:

$$\frac{mvZ}{K_p} \frac{\partial p_{s(r,t)}}{\partial t} = \left(\frac{\partial p_s^2(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p_{s(r,t)}}{\partial r} \right),$$

$$t > 0, r_6 < r < r_0, T \geq T_6. \quad (4)$$

Системанын чегинде берилген СКО – кургак көмүр үчүн 4-түрдөгү чек аралык шарт коюлат [5]:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_6-0} - \lambda_2(r) \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_6+0} = Q_6 W_6,$$

$$T_1(r_6, t) = T_2(r_6, t) = T_6, \quad (5)$$

(1)-(4) теңдемелердин системасы төмөнкү баштапкы жана чек аралык шарттардын негизинде чечилет:

$$0 < r < r_0, \quad T(r, 0) = T_0, \quad p(r, 0) = p_0, \quad \eta(r, 0) = \eta_0;$$

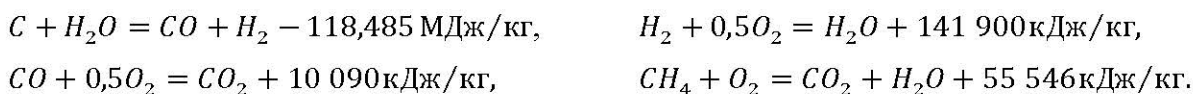
$$-\lambda_2(r_0) \frac{\partial T_2(r_0, t)}{\partial r} = \alpha [T_q - T_2(r_0, t)] + \varepsilon \sigma [T_q^4 - T_2^4(r_0, t)] + \sum_i Q_i W_i, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_1(0,t)}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial p(r_0,t)}{\partial r} = \frac{v}{K_p} u_s(r_0,t), \quad (8)$$

$$p(r_0,t) = p_0 \quad (9)$$

СКОнун күйүшү – суу буусу менен көмүртектин өз-ара аракеттенүүсүнүн жана термикалык ажыроонун продуктуларынын тутануусунунун кинетикасы менен аныкталган гетерогендик процесс. Бөлүкчөнүн бетинде төмөнкү реакциялар жүрөт [7]:



Бул реакциялардын ылдамдыгын аныктоо төмөнкү көз карандылык аркылуу жүрөт:

$$W_i = C_i \rho_i k_i \exp\left(-\frac{E}{RT(r_0,t)}\right), \quad (10)$$

мында, газ сымал компоненттердин тыгыздыгы төмөнкүчө эсептелинет:

$$\rho_i \frac{p(r,t)\mu}{T(r_0,t)R}. \quad (11)$$

Көзөнөктүү структуранын чегиндеги буунун фильтрлөөсүнүн ылдамдыгы Дарсинин закону боюнча төмөнкүчө аныкталат:

$$u_s = -\frac{K_p}{\mu} \frac{\partial p_s}{\partial r}. \quad (12)$$

Пиролиздин ылдамдыгы төмөнкү барабардыкты колдонуу менен эсептелинет:

$$W_i = (1 - \eta(r,t)) \rho_i k_i \exp\left(-\frac{E}{RT(r,t)}\right). \quad (13)$$

(1-13) - формулаларында төмөнкү белгилөөлөр колдонулду: T_0 – бөлүкчөнүн алгачкы температурасы, T_q - курчап турган чөйрөнүн температурасы, r_0 – буулануунун фронтунун радиусу, r_0 – бөлүкчөнүн сырткы радиусу, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$ – абсолюттук кара телонун нурлануу константасы, α – конвективдик жылуулук берүүнүн коэффициенти, c_1 – СКОнун берилген бөлүгүнүн жылуулук сыйымдуулугунун коэффициенти, c_2 – СКОнун кургак бөлүгүнүн жылуулук сыйымдуулугунун коэффициенти, λ_1 - СКОнун берилген бөлүгүнүн жылуулук өткөрүмдүүлүгүнүн коэффициенти, λ_2 - СКОнун кургак бөлүгүнүн жылуулук өткөрүмдүүлүгүнүн коэффициенти, W_0 – суунун бууланышынын массалык ылдамдыгы, Q_0 – суунун бууланышынын жылуулук эффектиси, Q_i – химиялык реакциянын жылуулук эффектиси, E – химиялык реакцияны активдештирүүнүн энергиясы, u_s – суу буусунун фильтрленишинин ылдамдыгы, $C_{p,s}$ – суу буусунун изобардык жылуулук сыйымдуулугу, ρ_s – буунун тыгыздыгы, p_s – бөлүкчөнүн ичиндеги буу фазасынын басымы, Z – суу буусунун кысылуу даражасы, K_p - көзөнөктүү структуранын өткөрүмдүүлүк даражасы, μ – суунун молярдык массасы, C_i – химиялык реакциянын тиешелүү компонентинин концентрациясы, i – химиялык реакциянын компонентинин катар номери, R – универсалдык газ туруктуусу.

Буулануунун чегинин координаталары төмөнкү туюнмадан табылат:

$$r_6 = r_0 - \int u_\phi dt,$$

мында, $u_\phi = W_6/\rho_\phi$ – буулануунун фронтунун алдыга жылышынын сызыктуу ылдамдыгы. Буулануунун массалык ылдамдыгы төмөнкү формула менен эсептелинет:

$$W_{н6} = W_0 \exp\left(\frac{Q_6 \mu_s (T_1 - T_T)}{R \cdot T_T \cdot T_1}\right). \quad (14)$$

мында, T_1 – буулануунун чегиндеги температура, T_T – тоңуу чекитине туура келген суюктуктун температурасы, W_0 – T_T температурасындагы буулануунун ылдамдыгы, μ_s – суу буусунун молярдык массасы.

Отундун нымдуу жана “суусуздандырылган” бөлүктөрүнүн термофизикалык касиеттери компоненттердин көлөмдүк үлүштөрүн эске алуу менен эсептелинет:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4 & \lambda_2 &= \varphi_4 \lambda_4 + \varphi_5 \lambda_5 + \varphi_6 \lambda_6 \\ C_1 &= \varphi_3 C_3 + \varphi_4 C_4 & C_2 &= \varphi_4 C_4 + \varphi_5 C_5 + \varphi_6 C_6 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\rho_1 = \varphi_3 \rho_3 + \varphi_4 \rho_4 \quad \rho_2 = \varphi_4 \rho_4 + \varphi_5 \rho_5 + \varphi_6 \rho_6$$

Мында, φ – отундун тиешелүү компонентинин көлөмдүк үлүшү, 3 – суу, 4 – температурасы T_* дан аз болгон көмүр, 5 – температурасы T_* дан көп болгон көмүр, 6 – аба, T_* - отундун органикалык бөлүгүнүн ажыралышы башталган кездеги температура.

Жекече маселенин коюлушу жана аны чечүүнүн методу. СКОнун бөлүкчөсүнүн күйүү процессинин 1-стадиясы болгон – “Суу бууланып баштаганга чейинки жылытуу” маселесин чечүүнү карайлы. Изилдөө максатында жалпы таш көмүрдүн ичинен күрөң көмүрдүн термофизикалык касиеттери колдонулду [9,10]:

I – нымдуу отун жайгашкан аймак үчүн СКОнун термофизикалык касиеттери (15) формуланын негизинде төмөнкүдөй алынды:

$$\begin{aligned} T_0 &= 300 \text{ K}, T_q = 1400 \text{ K}, \quad \lambda = 0,366 \frac{\text{Вт}}{\text{МК}}, \quad C_p = 2,2944 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}, \quad \rho = 613 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \\ \alpha &= (100 - 500) \text{ Вт/м}^2\text{К}; \quad a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}, \quad 0 < \varepsilon < 1; \quad \sigma = 0,0000000567; \quad r_0 = 1 \end{aligned}$$

T_q температурадагы сырткы чөйрөнүн таасири менен бөлүкчөнү жылытуу жүрдү. Бизге белгилүү болгондой, 1-стадия $\sim 110^\circ\text{C}$ температурада аяктайт.

Коюлган маселенин математикалык коюлушу төмөнкүчө болот:

Бөлүкчөдө стационардык эмес жылуулук берүү теңдемеси баштапкы жана чек аралык шарттардын негизинде чечилсин [8]:

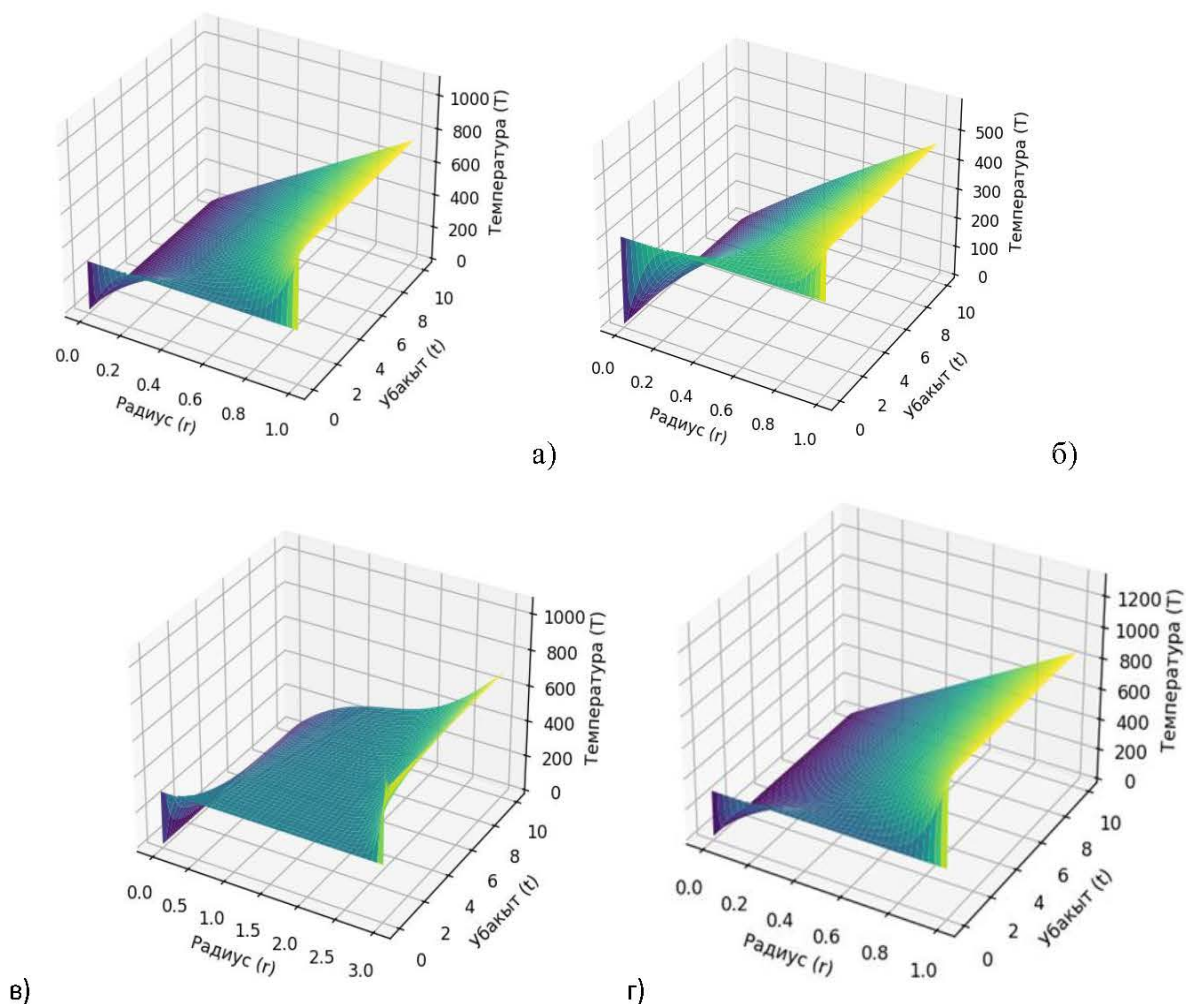
$$\frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} 0 < t < t_n, \quad 0 < r < r_0, \quad T_0 < T < T_n, \\ 0 < r < r_0, \quad T_1(r, 0) &= T_0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_1(0, t)}{\partial r} = 0 \quad (18)$$

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(r_0, t)}{\partial r} = \alpha \cdot [T_q - T_1(r_0, t)] + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_q^4 - T_1^4(r_0, t)] \quad (19)$$

Коюлган (16-19) - маселе “Чектүү айырмалар” сандык усулунун жардамында чечилет. Сандык усулду Python программалоо тилинин жардамында ишке ашырып, жыйынтыгында төмөнкүгө ээ болобуз:



2-сүрөт. “Суу бууланып баштаганга чейинки жылытуу” процессине факторлордун таасири

Жыйынтык. “Суу бууланып баштаганга чейинки жылытуу” процессин сандык моделдөөдө $T_{\text{ч}}$ - сырткы чөйрөнүн температурасы, r_0 – бөлүкчөнүн сырткы радиусу, ε – беттин эмиссивдүүлүгү сыяктуу факторлордун маанилери терең изилденди. Алардын маанилери $0 < \varepsilon < 1$, $900 < T_{\text{ч}} < 1500$, $r_0 = 1$ диапазондорунда каралды. Сырткы чөйрөнүн температурасынын жана беттин эмиссивдүүлүгүнүн маанилерин бир убакытта өстүрүү менен беттин ичиндеги температуранын бөлүштүрүлүшүнүн мааниси бир топ чоң өсүшкө ээ болду. Демек, температуранын бөлүштүрүлүшүнө бардык факторлордун ичинен беттин эмиссивдүүлүгү өтө чоң түз таасирин тийгизери келип чыкты (2-сүрөт, а), б), в), г)).

Адабияттар:

1. Морозов А. Г., Коренюгина Н.В. – Гидродарные технологии для получения водоугольного топлива//Новости теплоснабжения.-2010.-№7-С.18-21.
2. Иванов В.М. Канторович Б.В. Топливные эмульсии и суспензии // Металлургия, Москва, 1963.
3. Флек Е. С. Разработка физической модели горения капли водоугольного топлива // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 102–105.
4. Делягин Г.А. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха // Сб. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: изд-во АН СССР, 1967. С. 45-55.
5. Аналитическое описание процесса нестационарной теплопроводности / Б.А. Вороненко, А.Г. Крысин, В.В. Пеленко, О.А. Цуранов: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 48 с.
6. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости, Л., 1975. – 592 с.
7. Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П. Газификация углерода в парах воды.// Химическая физика. 2009. Т.28. № 8. С. 36–