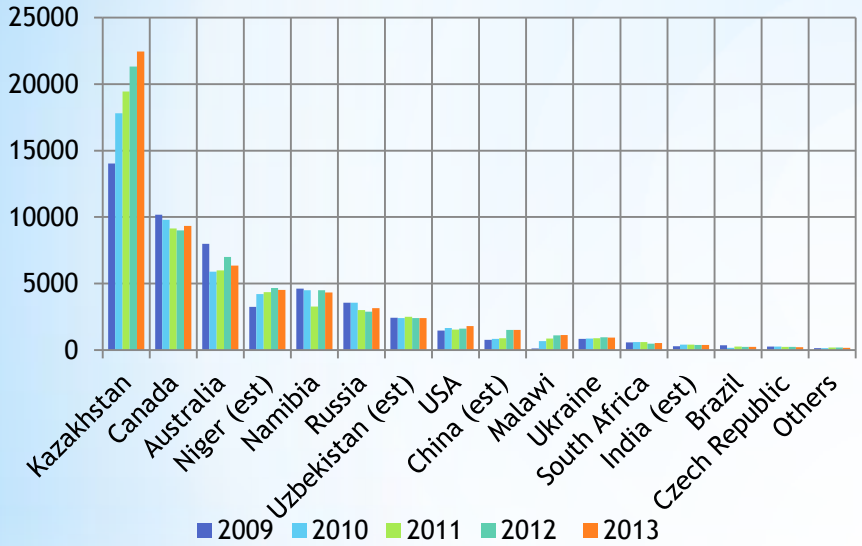
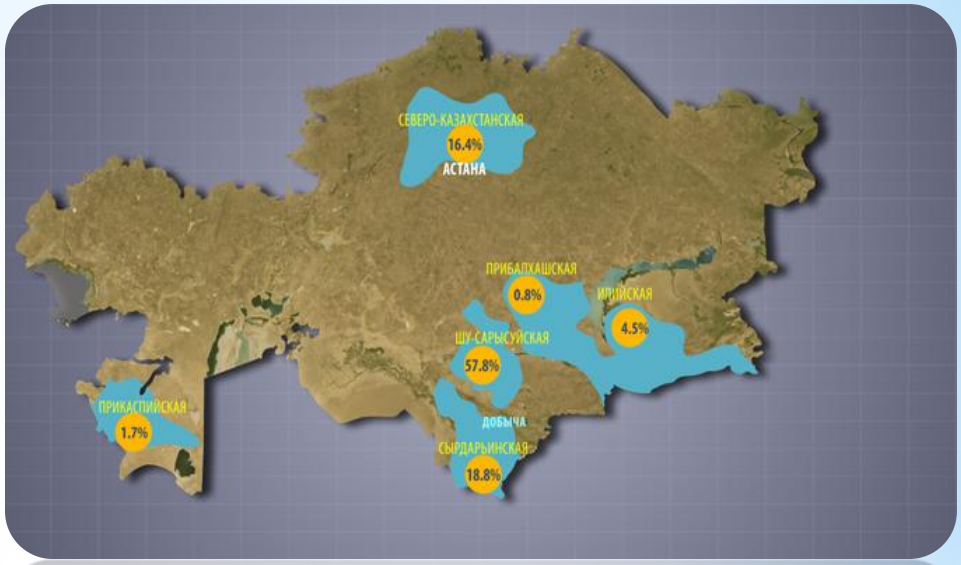
Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті
Механика-Математика факультеті

УРАНДЫ ЖЕРАСТЫ ШАЙМАЛАУ АРҚЫЛЫ ӨНДІРУ ПРОЦЕССІН АҒЫН СЫЗЫҚ ӘДІСІМЕН МОДЕЛЬДЕУ

Орындаған: 2-курс магистрант Құрмансейіт М.
Ғылыми жетекшілер: ф.-м.ғ.к.,профессор Қалтаев А.,
PhD Кульджабеков А.Б.

Қазақстан бойынша уран қорының орналасуы мен өндіру диаграммасы

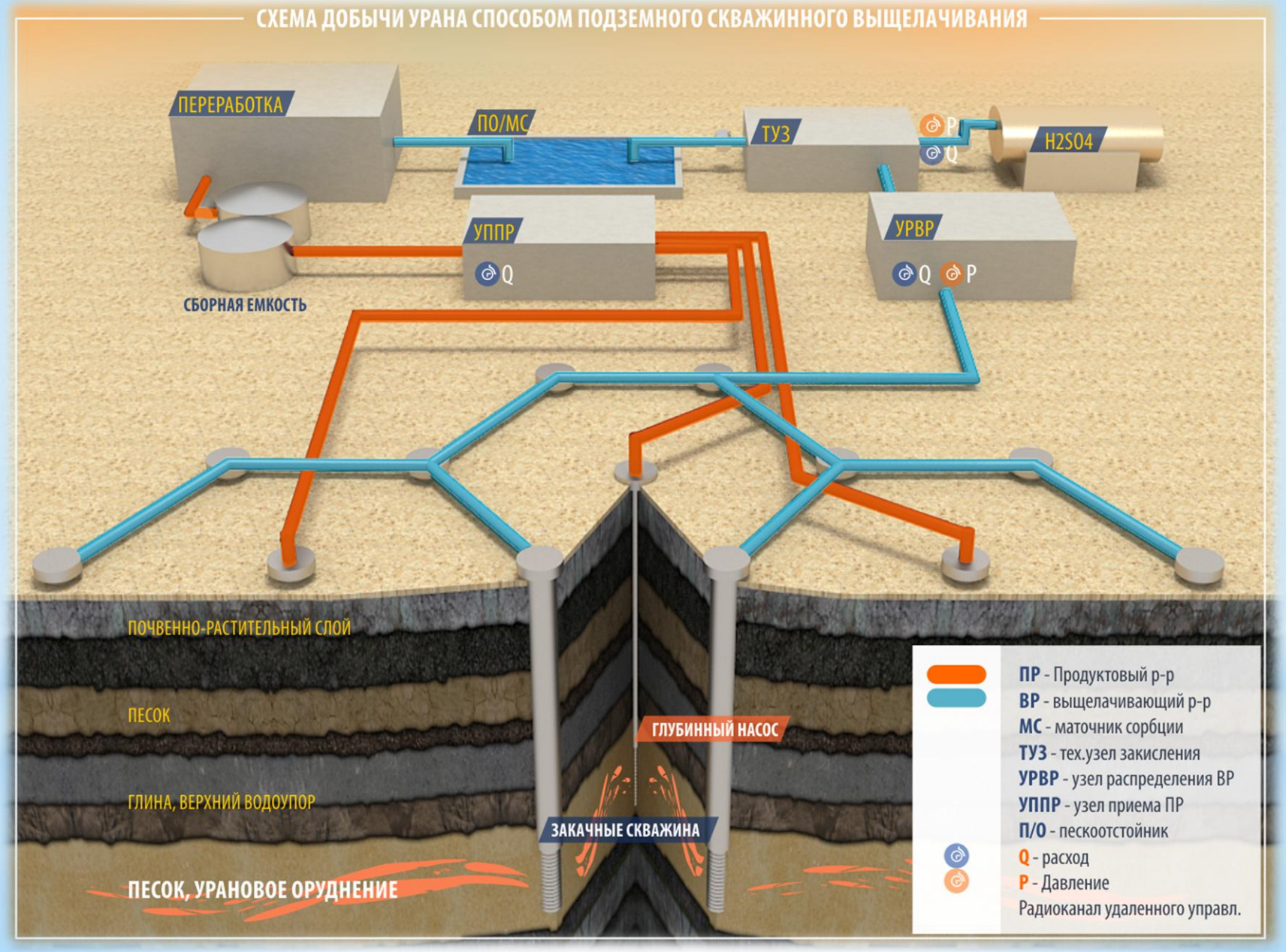




Қазақстанда уран қоры бойынша әлемде 15-20% құрайды және алғашқы 2-орынды алады. 2009 жылдан бастап Қазақстан уран өндіру бойынша алғашқы орында болып келеді және бүкіл кен орындар жер асты шаймалау әдісімен өндіріледі

http://www.kazatomprom.kz/#!/industry/uranium/exploration

Жер асты шаймалау әдісі



http://www.kazatomprom.kz/#!/industry/uranium/Uranium-mining

Химиялық реакция

Қарапайым жағдайы үшін:

$$UO_3 + H_2SO_4 = UO_2SO_4 + H_2O \qquad (1)$$

Гипстың пайда болуын ескерсек:

$$\begin{cases} UO_2 + H_2SO_4 + O = UO_2SO_4 + H_2O \\ CaCO_3 + H_2SO_4 = CaSO_4 + H_2CO_3 \end{cases} \qquad (2)$$

Бүкіл реакцияларды ескерсек:

$$\begin{cases} UO_2 \times 2UO_3 + 2H_2SO_4 = UO_2 + 2UO_2SO_4 + 2H_2O \\ 2Fe(OH)_3 + 3H_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + 6H_2O \\ UO_2 + Fe_2(SO_4)_3 = UO_2SO_4 + 2FeSO_4 \\ CaCO_3 + H_2SO_4 = CaSO_4 + H_2CO_3 \end{cases} \qquad (3)$$

Математикалық модель

$$div\vec{U}\phi = \sum Q_l \qquad (4)$$ Сығылмайтын орта үшін жазылған массаның сақталу заңы

$$\vec{U}\phi = -Kgradh \qquad (5)$$ Дарси заңы

$$\underbrace{UO_2}_{s1} \times \underbrace{2UO_3}_{} + \underbrace{2H_2SO_4}_{1} = \underbrace{UO_2}_{s2} + \underbrace{2UO_2SO_4}_{2} + \underbrace{2H_2O}_{3}$$

$$\underbrace{2Fe(OH)_3}_{s3} + \underbrace{3H_2SO_4}_{1} = \underbrace{Fe_2(SO_4)_3}_{4} + \underbrace{6H_2O}_{3}$$

$$\underbrace{UO_2}_{s2} + \underbrace{Fe_2(SO_4)_3}_{4} = \underbrace{UO_2SO_4}_{2} + \underbrace{2FeSO_4}_{5}$$

$$\underbrace{CaCO_3}_{s4} + \underbrace{H_2SO_4}_{1} = \underbrace{CaSO_4}_{s5} + \underbrace{H_2CO_3}_{6}$$

$$\frac{\partial C^{(s1)}}{\partial t} = -\frac{k_I}{(1-\theta)\rho_s} C^{(s1)} \left(C^{(1)}\right)^2 \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \qquad (6a)$$

$$\frac{\partial C^{(s2)}}{\partial t} = \frac{1}{(1-\theta)\rho_s} \left(k_I C^{(s1)} \left(C^{(1)}\right)^2 - k_{III} C^{(s2)} C^{(4)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right) \qquad (6b)$$

$$\frac{\partial C^{(s3)}}{\partial t} = -\frac{2k_{II}}{(1-\theta)\rho_s} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3 \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \qquad (6c)$$

$$\frac{\partial C^{(s4)}}{\partial t} = -\frac{k_{IV}}{(1-\theta)\rho_s} C^{(s4)} C^{(1)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \qquad (6d)$$

$$\frac{\partial C^{(s5)}}{\partial t} = \frac{k_{IV}}{(1-\theta)\rho_s} C^{(s4)} C^{(1)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \qquad (6e)$$

$$\frac{\partial C^{(1)}}{\partial t} + \vec{U} gradC^{(1)} = divD^{(1)} gradC^{(1)} + \qquad (7a)$$
$$+\frac{1}{\theta\rho_l}\left(-2k_I \left(C^{(s1)}\right)^2 C^{(1)} - 3k_{II} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3 - k_{IV} C^{(s4)} C^{(1)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right)$$

$$\frac{\partial C^{(2)}}{\partial t} + \vec{U} gradC^{(2)} = divD^{(2)} gradC^{(2)} + \qquad (7b)$$
$$+\frac{1}{\theta\rho_l}\left(2k_I \left(C^{(s1)}\right)^2 C^{(1)} + k_{III} C^{(s2)} C^{(4)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right)$$

$$\frac{\partial C^{(3)}}{\partial t} + \vec{U} gradC^{(3)} = divD^{(3)} gradC^{(3)} + \qquad (7c)$$
$$+\frac{1}{\theta\rho_l}\left(2k_I \left(C^{(s1)}\right)^2 C^{(1)} + 6k_{II} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right)$$

$$\frac{\partial C^{(4)}}{\partial t} + \vec{U} gradC^{(4)} = divD^{(4)} gradC^{(4)} + \qquad (7d)$$
$$+\frac{1}{\theta\rho_l}\left(k_{II} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3 - k_{III} C^{(s2)} C^{(4)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right)$$

$$\frac{\partial C^{(5)}}{\partial t} + \vec{U} gradC^{(5)} = divD^{(5)} gradC^{(5)} \qquad (7e)$$
$$+\frac{2k_{III}}{\theta\rho_l} C^{(s2)} C^{(4)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right)$$

$$\frac{\partial C^{(6)}}{\partial t} + \vec{U} gradC^{(6)} = divD^{(6)} gradC^{(6)} \qquad (7f)$$
$$+\frac{k_{IV}}{\theta\rho_l} C^{(s4)} C^{(1)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right)$$

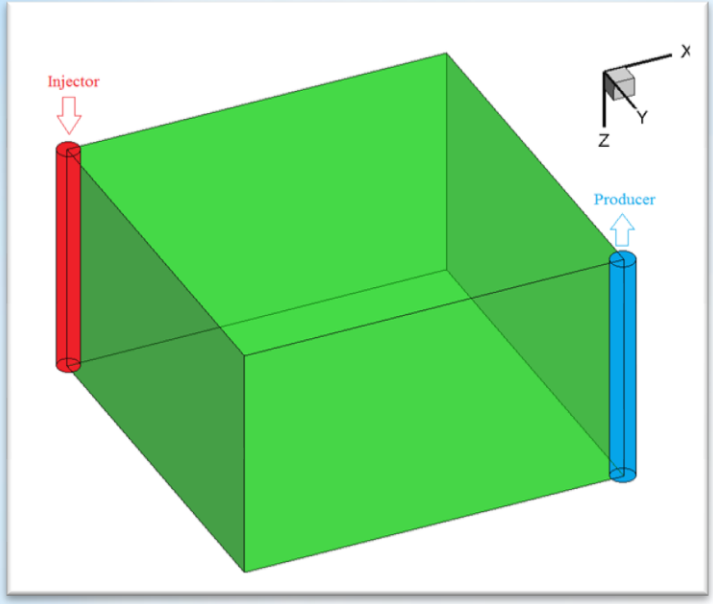
мұндағы

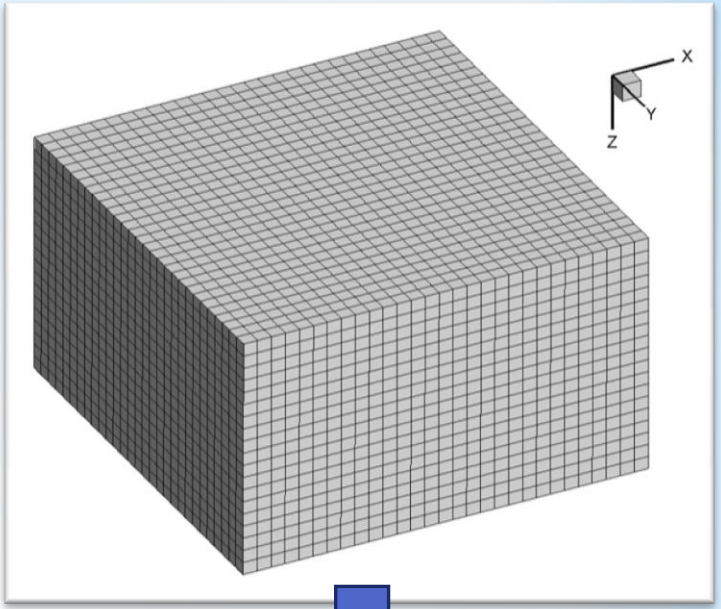
$C^{(sk)}$- Қатты k компонентаның концентрациясы,

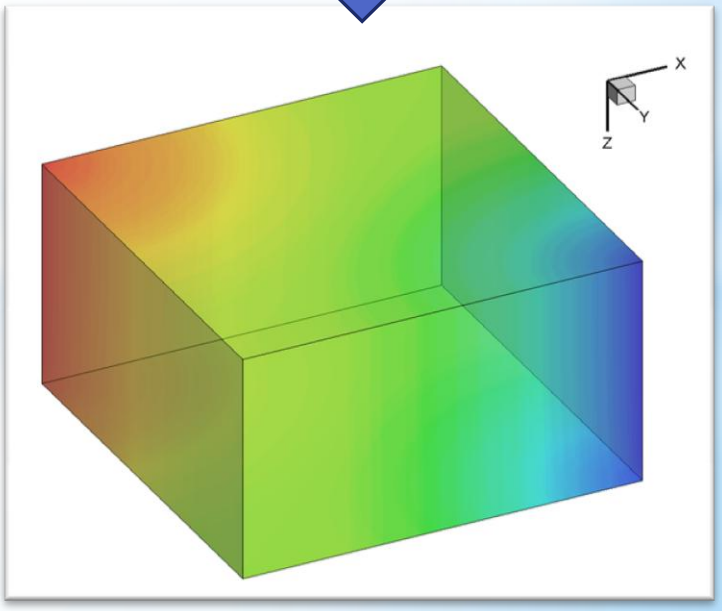
$C^{(k)}$- Сұйық k компонентаның концентрациясы, β- эмпирикалық параметр

Қысым теңдеуін шешу және жылдамдықтар өрісін анықтау

Қарапайым жағдай үшін біртекті изотропты кеуекті ортаны қарастырамыз







$$div\vec{U}\phi = \sum Q_l \quad (4) \Leftarrow \vec{U}\phi = -Kgradh \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial h}{\partial z}\right)=Q_{inj}\delta(\vec{r}-\vec{r}_{inj})+Q_{pr}\delta(\vec{r}-\vec{r}_{pr}) \quad (5^*)$$

Q^k_{inj}, Q^l_{pr} - бірлік көлемдегі көлемдік шығын болып келеді, егер таңбасы оң болса шығынның көзі (бұлақ, источник), ал теріс болып келсе шығын арыны (сток) болып келеді

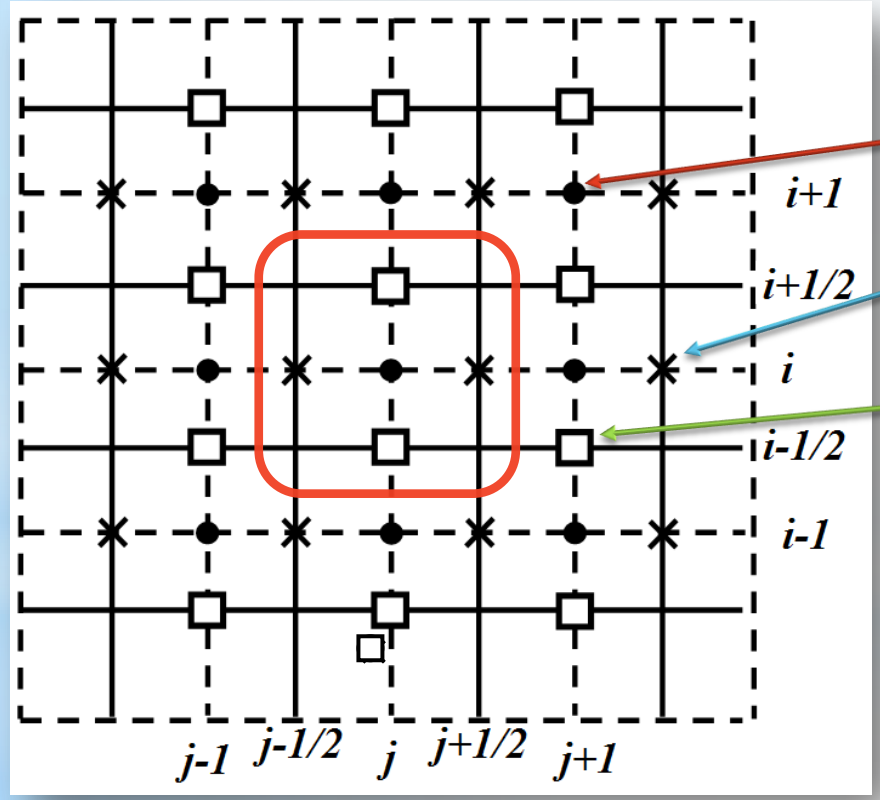
δ - Дирактың дельта фунуциясы,
M, L – сәйкесінше айдайтын жіне өндіретін ұңғылар саны.

Қысым теңдеуін шешу және жылдамдықтар өрісін анықтау

$$K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K$$

$$K_{yx} = K_{xz} = K_{yx} = K_{yz} = K_{zx} = K_{zy} = 0$$

Біртекті изотропты кеуекті орта үшін жазылған өткізгіштік коэфиценті



Гидравликалық қысымды және басқа да сколяр шамаларды есептеу үшін арналған түйін (нүкте)

бойлық жылдамдық компоненттерін есептеу үшін арналған түйін (нүкте)

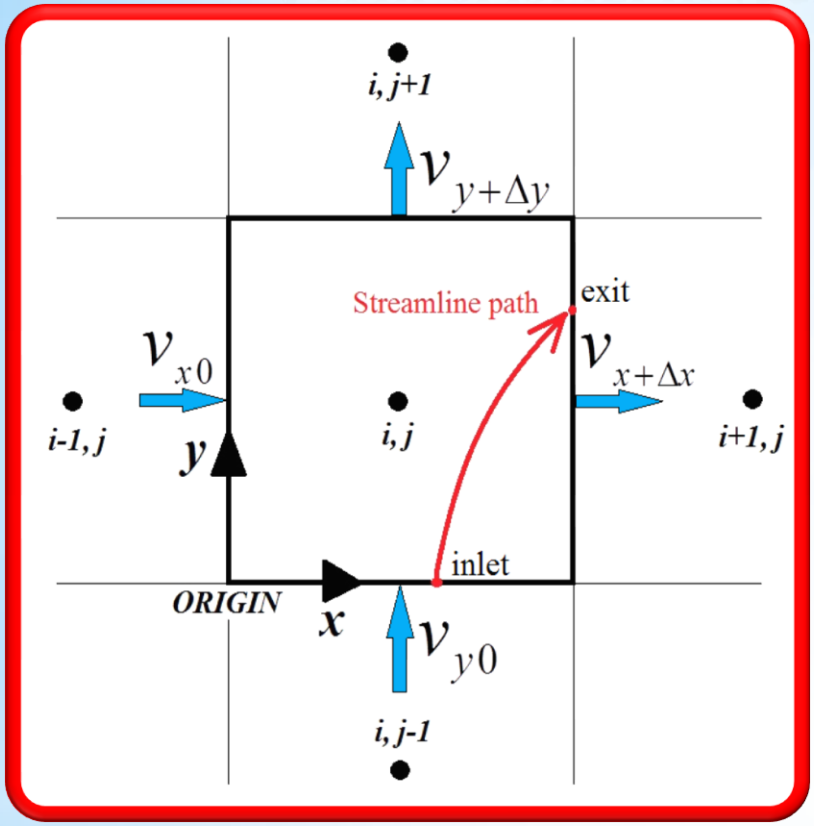
көлденең жылдамдық компоненттерін есептеу үшін арналған түйін (нүкте)

Дарси заңы

$$\vec{U}\phi = -K grad(h) \qquad (5)$$

$$\vec{U}$$

Ағын сызығын (Streamline) қалай сызамыз?



1-сурет. Декарттық координата үшін Поллактың 3D ізсалу әдісі. Кіре берістегі нүктені кез-келген деп алғанда, шыға берістегі нүкте кординатасы мен кеткен уақыт аналитикалық түрде табылады. (Batycky et al. 1997)

Айдайтын жерден өндіретін жерге дейінгі ағын сызығының ізін салу үшін декарттақ координатаға арналған Поллактың 3D ізсалу әдісін қолданамыз

$$d\tau = \frac{dt}{\phi} = \frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_Z} \qquad (8)$$

$$v_x = v_{x0} + g_x(x - x_0) \qquad g_x = \frac{v_{x+\Delta x} - v_{x0}}{\Delta x} \qquad (9)$$

$$\Delta t_x = \frac{1}{g_x}\ln\left(\frac{v_{x0} + g_x(x_e - x_0)}{v_{x0} + g_x(x_i - x_0)}\right)$$

$$\Delta t_y = \frac{1}{g_y}\ln\left(\frac{v_{y0} + g_y(y_e - y_0)}{v_{y0} + g_y(y_i - y_0)}\right)$$

$$\Delta t_z = \frac{1}{g_z}\ln\left(\frac{v_{z0} + g_z(z_e - z_0)}{v_{z0} + g_z(z_i - z_0)}\right)$$

(10)

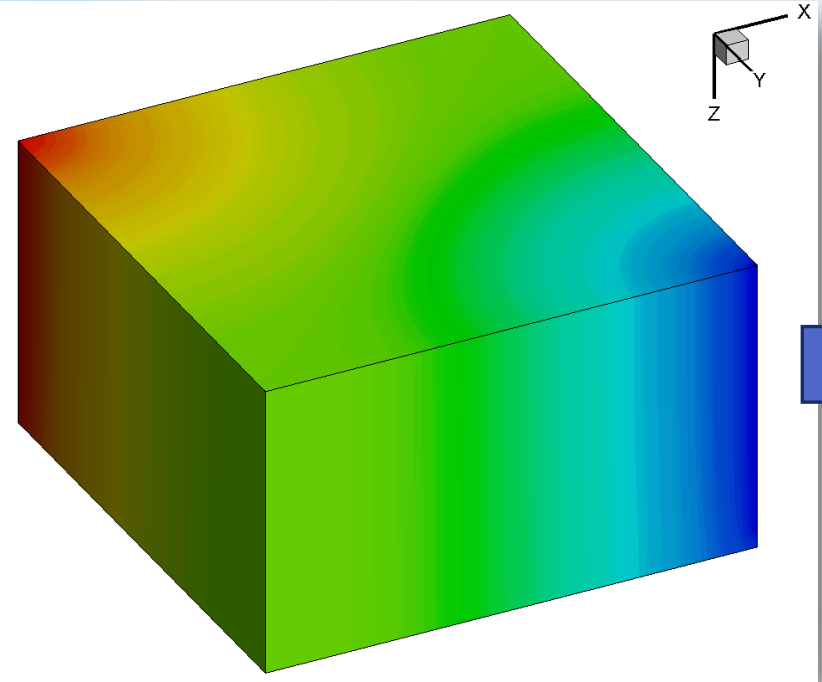
$$x_e = \frac{1}{g_x}\ln\left[v_{xi}\exp(g_x\Delta t_{\min}) - v_{x0}\right] + x_0$$

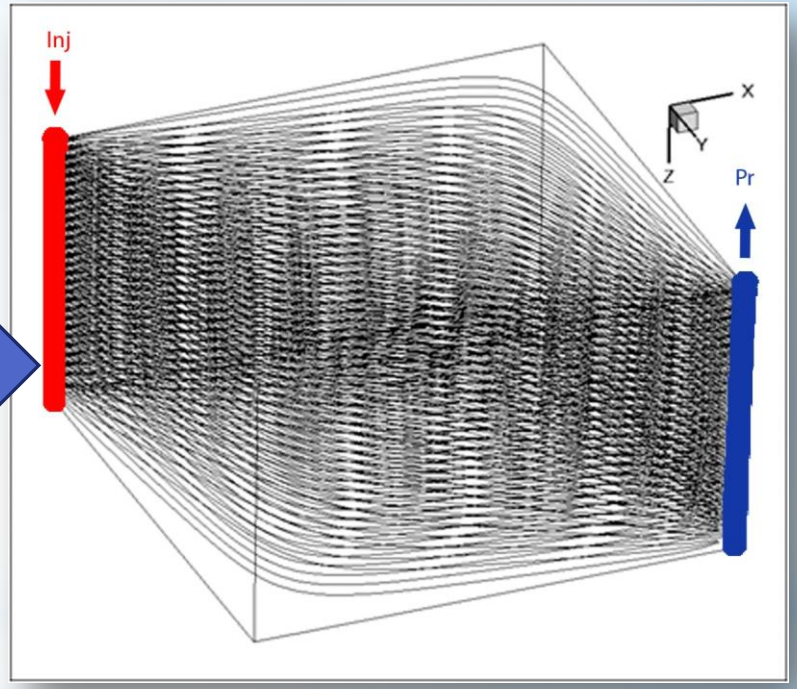
$$y_e = \frac{1}{g_y}\ln\left[v_{yi}\exp(g_y\Delta t_{\min}) - v_{y0}\right] + y_0$$

$$z_e = \frac{1}{gz}\ln\left[v_{zi}\exp(g_z\Delta t_{\min}) - v_{z0}\right] + z_0$$

(11)

Өткізгіштігі изотропты ортадағы ағын сызығының 3D ізсалуы

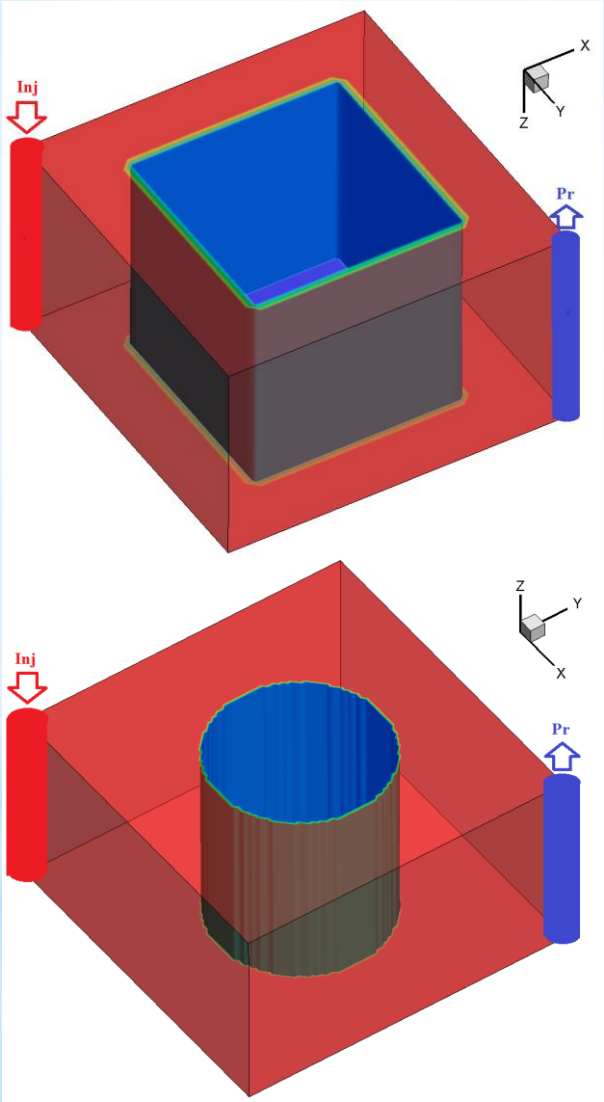




Қысымның таралуы

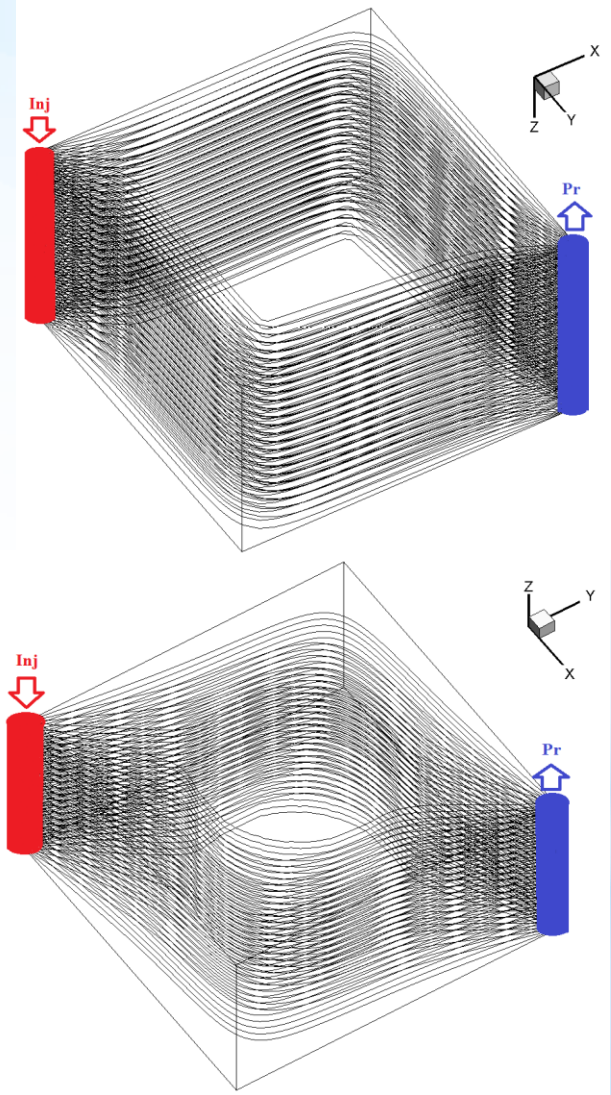
Ағын сызығы

Ағын сызығы - 3D еңістіктегі, ортасында өткізбейтін орта үшін



$K > 0$

$K = 0$



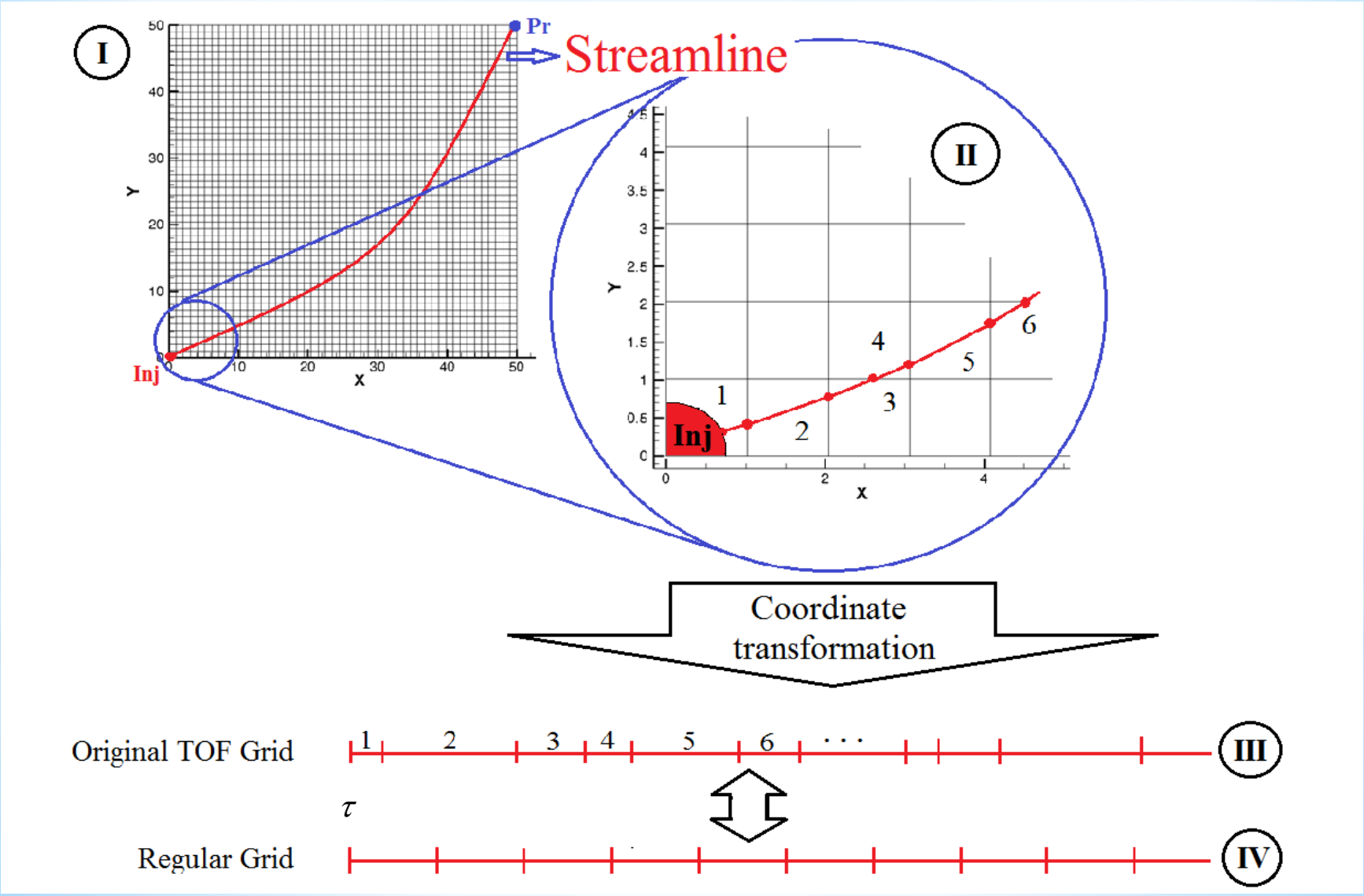
Кеуекті ортаның өткізгіштігі

Ағын сызығы

3D дан 1D ға өту

Кордината айнымалыларын жүріп өту уақытына түрлендіру:

$$\vec{V} \bullet \nabla C \equiv \phi \frac{\partial C}{\partial \tau} \quad (12) \qquad d\tau = \frac{dt}{\phi} = \frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y} = \frac{dz}{V_Z} \quad (8)$$



Қатты кампоненталар үшін жазылған концентрацияның тасымал теңдеуі

$$\frac{\partial C^{(s1)}}{\partial t} = -\frac{k_I}{(1-\theta)\rho_s} C^{(s1)} \left(C^{(1)}\right)^2 \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (13a)$$

$$\frac{\partial C^{(s2)}}{\partial t} = \frac{1}{(1-\theta)\rho_s} \left(k_I C^{(s1)} \left(C^{(1)}\right)^2 - k_{III} C^{(s2)} C^{(4)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (13b)$$

$$\frac{\partial C^{(s3)}}{\partial t} = -\frac{2k_{II}}{(1-\theta)\rho_s} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3 \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (13c)$$

$$\frac{\partial C^{(s4)}}{\partial t} = -\frac{k_{IV}}{(1-\theta)\rho_s} C^{(s4)} C^{(1)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (13d)$$

$$\frac{\partial C^{(s5)}}{\partial t} = \frac{k_{IV}}{(1-\theta)\rho_s} C^{(s4)} C^{(1)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (13e)$$

Сұйық кампоненталар үшін жазылған концентрацияның тасымал теңдеуі

$$\frac{\partial C^{(1)}}{\partial t} + \frac{\partial C^{(1)}}{\partial \tau} = \frac{1}{\theta\rho_l} \left(-2k_I \left(C^{(s1)}\right)^2 C^{(1)} - 3k_{II} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3 - k_{IV} C^{(s4)} C^{(1)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (14a)$$

$$\frac{\partial C^{(2)}}{\partial t} + \frac{\partial C^{(2)}}{\partial \tau} = \frac{1}{\theta\rho_l} \left(2k_I \left(C^{(s1)}\right)^2 C^{(1)} + k_{III} C^{(s2)} C^{(4)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (14b)$$

$$\frac{\partial C^{(3)}}{\partial t} + \frac{\partial C^{(3)}}{\partial \tau} = \frac{1}{\theta\rho_l} \left(2k_I \left(C^{(s1)}\right)^2 C^{(1)} + 6k_{II} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (14c)$$

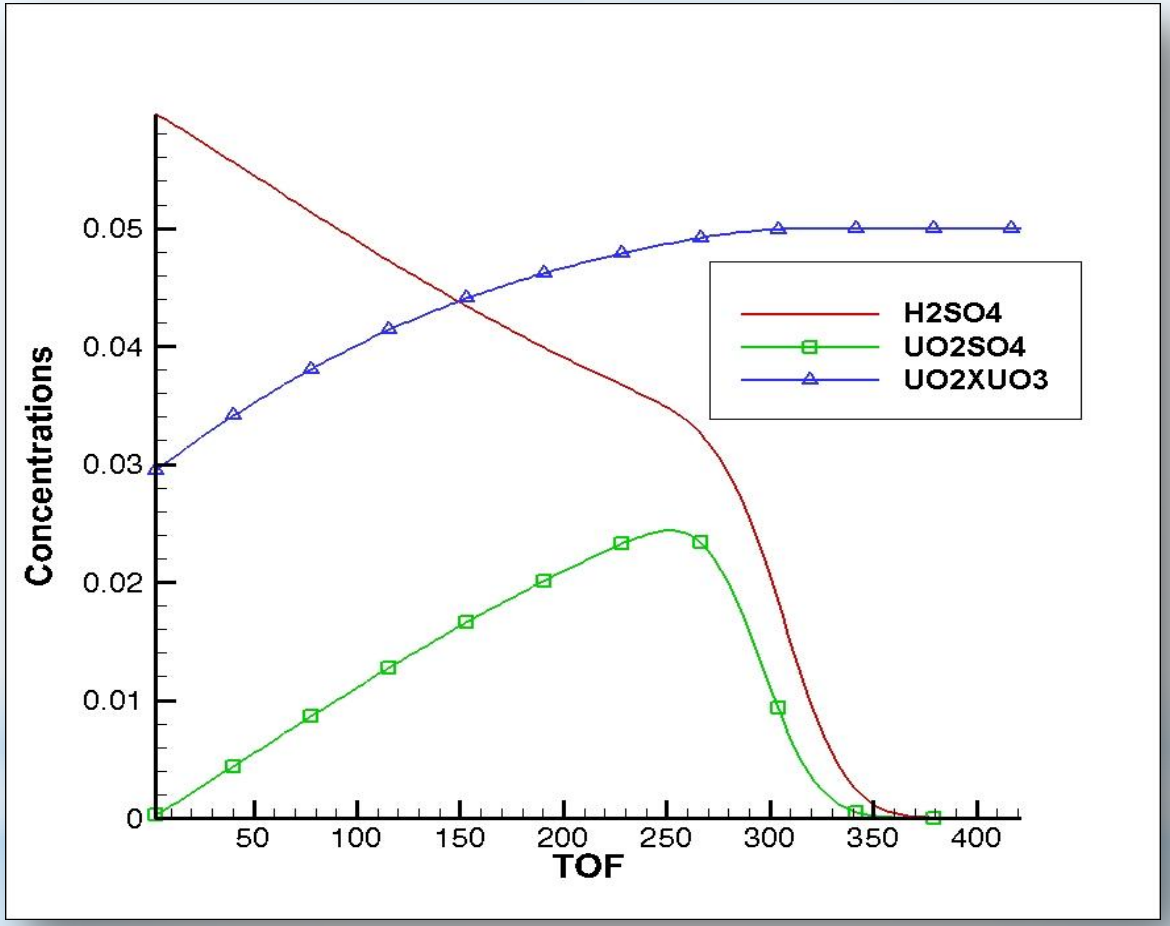
$$\frac{\partial C^{(4)}}{\partial t} + \frac{\partial C^{(4)}}{\partial \tau} = \frac{1}{\theta\rho_l} \left(k_{II} \left(C^{(s3)}\right)^2 \left(C^{(1)}\right)^3 - k_{III} C^{(s2)} C^{(4)}\right)\left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (14d)$$

$$\frac{\partial C^{(5)}}{\partial t} + \frac{\partial C^{(5)}}{\partial \tau} = \frac{2k_{III}}{\theta\rho_l} C^{(s2)} C^{(4)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (14e)$$

$$\frac{\partial C^{(6)}}{\partial t} + \frac{\partial C^{(6)}}{\partial \tau} = \frac{k_{IV}}{\theta\rho_l} C^{(s4)} C^{(1)} \left(1-\beta C^{(s5)}\right) \quad (14f)$$

Реагенттің таралуының ағын сызық әдістері арқылы шығарылған шешімінің бейнесі

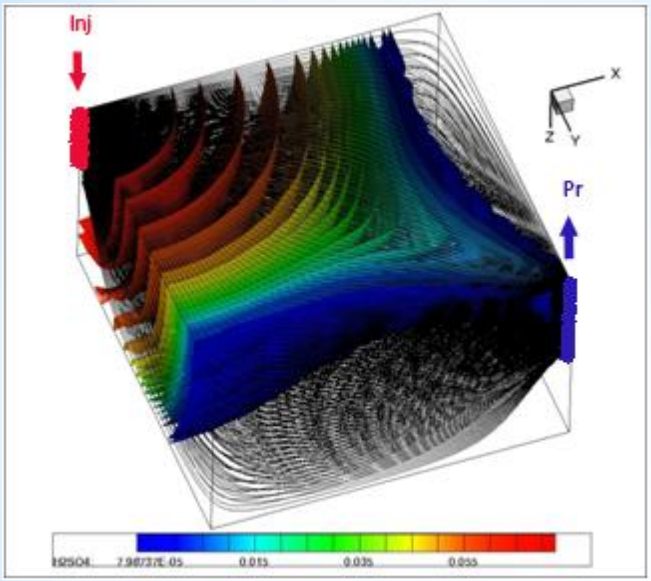
$$UO_2 \times 2UO_3 + 2H_2SO_4 = UO_2 + 2UO_2SO_4 + 2H_2O$$



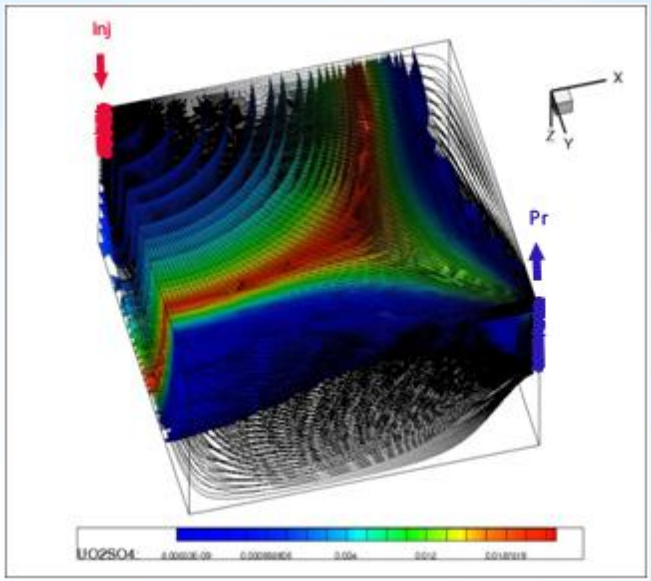
Ағын сызығының жүріп өткен жолында ерітінді қоспа мен қатты минералдық компонеттерінің өзгерісі

1D дан 3D ға көшкен кездегі алынған нәтижелер

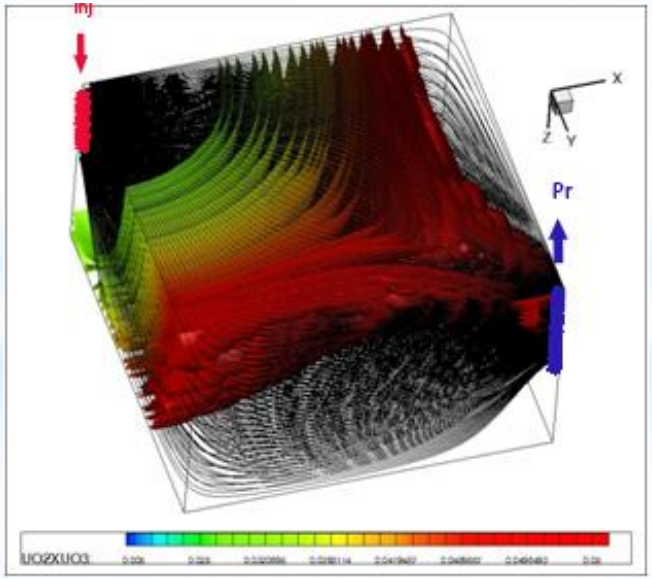
a



b

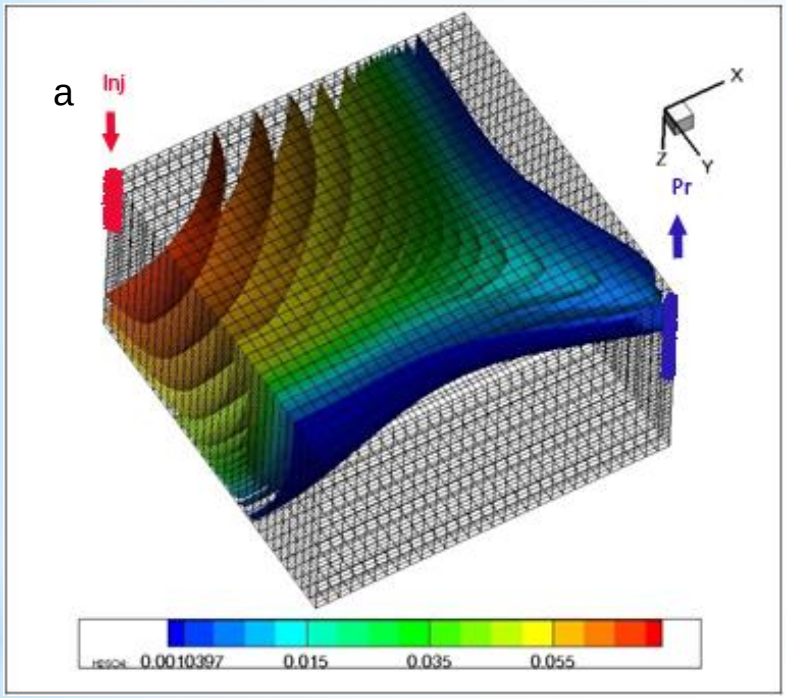


c

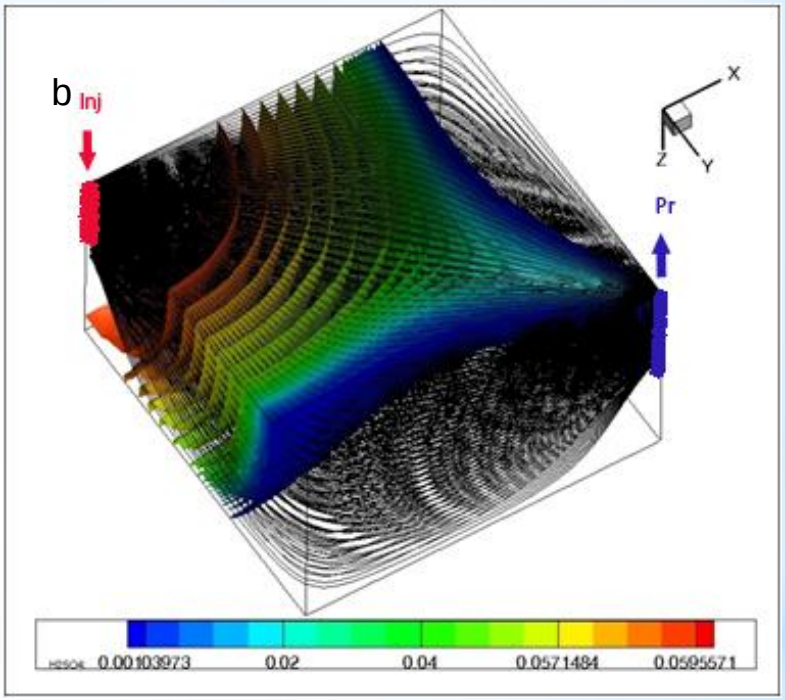


Күкірт қышқыл (a), ерітілген минерал (b) және қатты минералдың (c) таралуы

Шекті айырымды схема мен ағын сызық әдістерін салыстыру

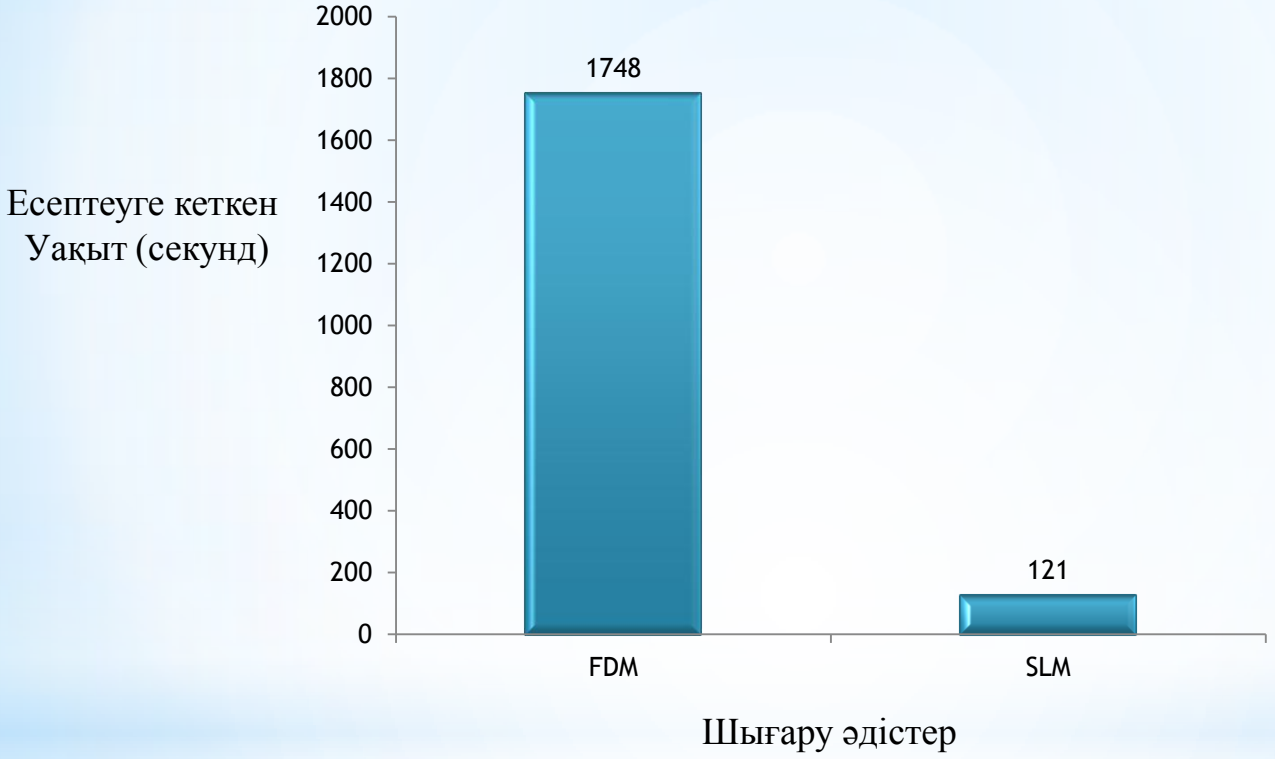


Шекті айырымды схема
(30x30x30)



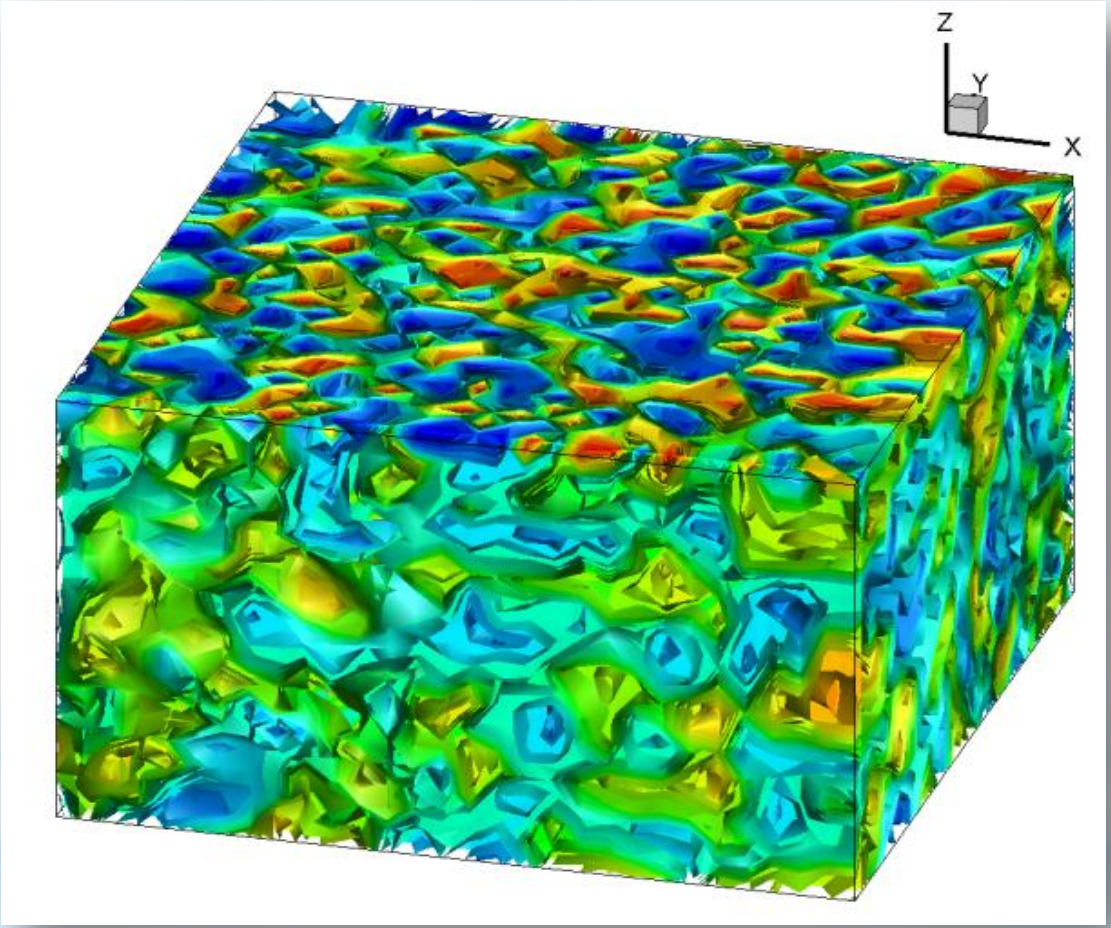
Ағын сызық әдісі
(1000 ағын сызығынан тұрғанда)

Есептеу уақыты



Шекті айырымды схема (FDM) (30x30x30) және ағын сызық әдісі (1000 ағын сызығынан тұрғанда)

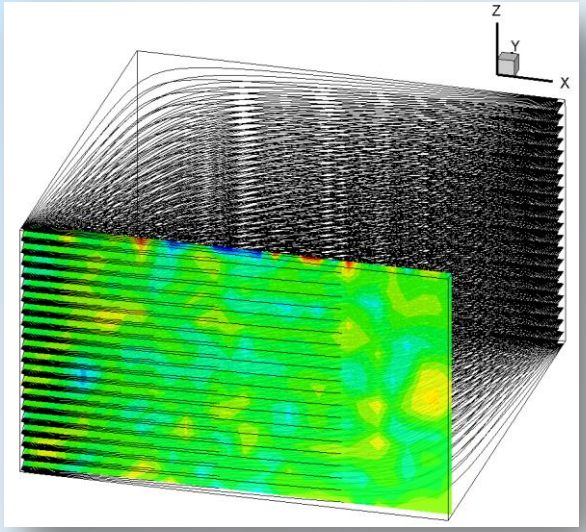
Біртекті емес орта



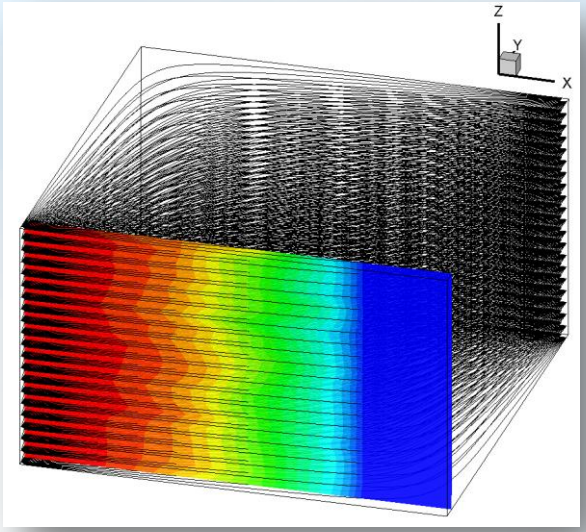
Өткізгіштік коэфиценті әртүрлі жағдайда

$$K_{xx} \neq K_{yy} \neq K_{zz}$$

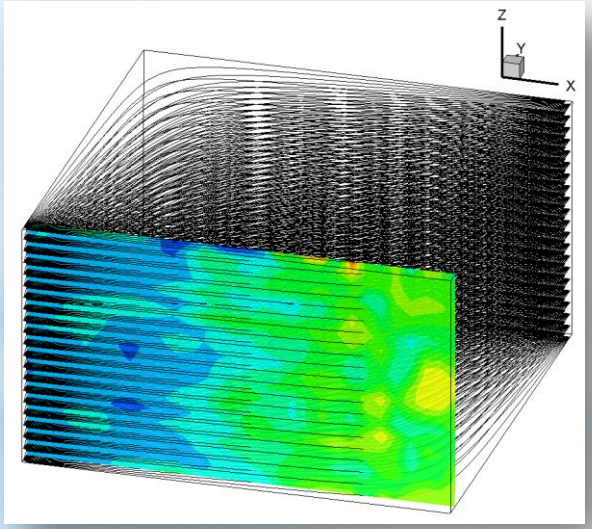
a



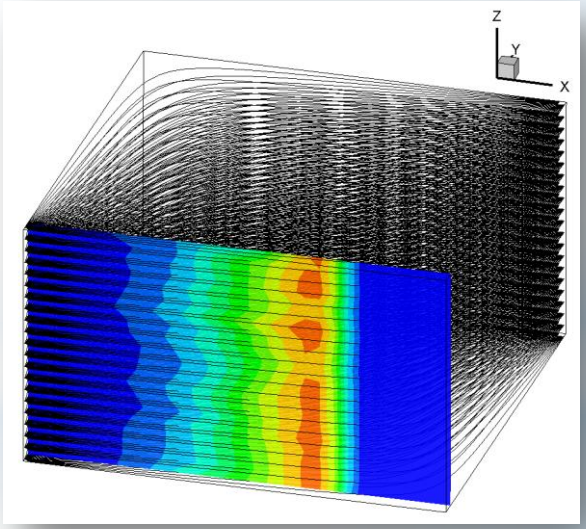
b



c

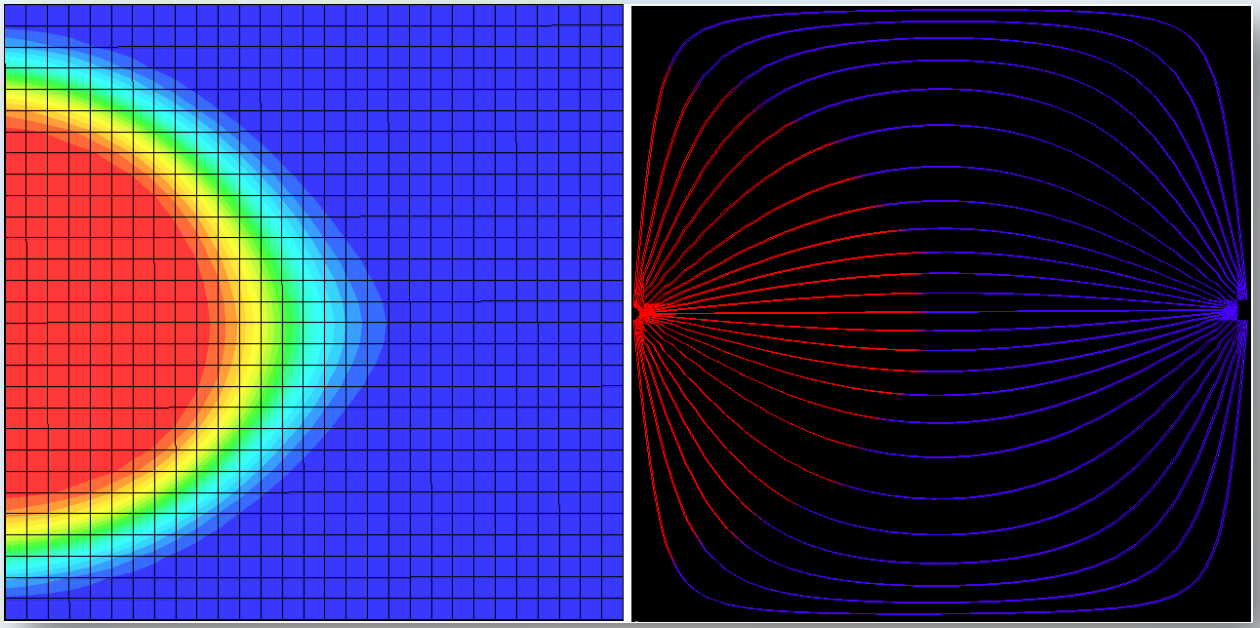


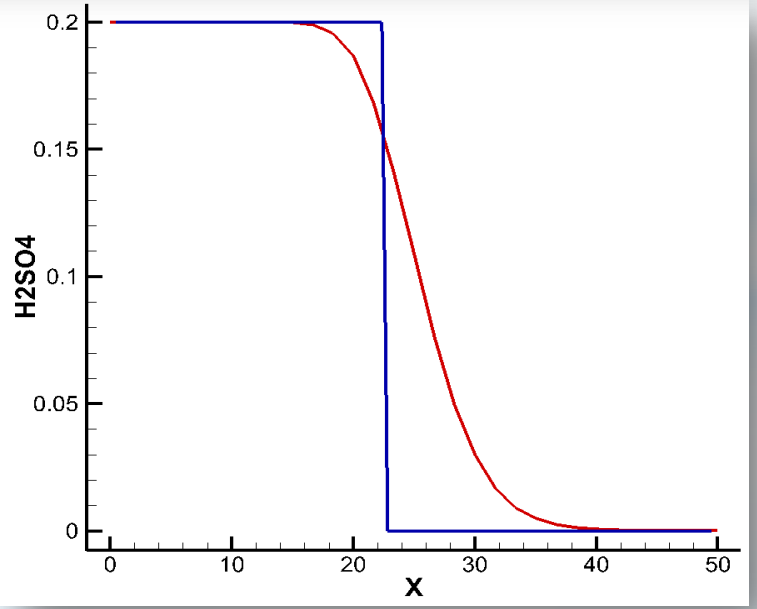
d



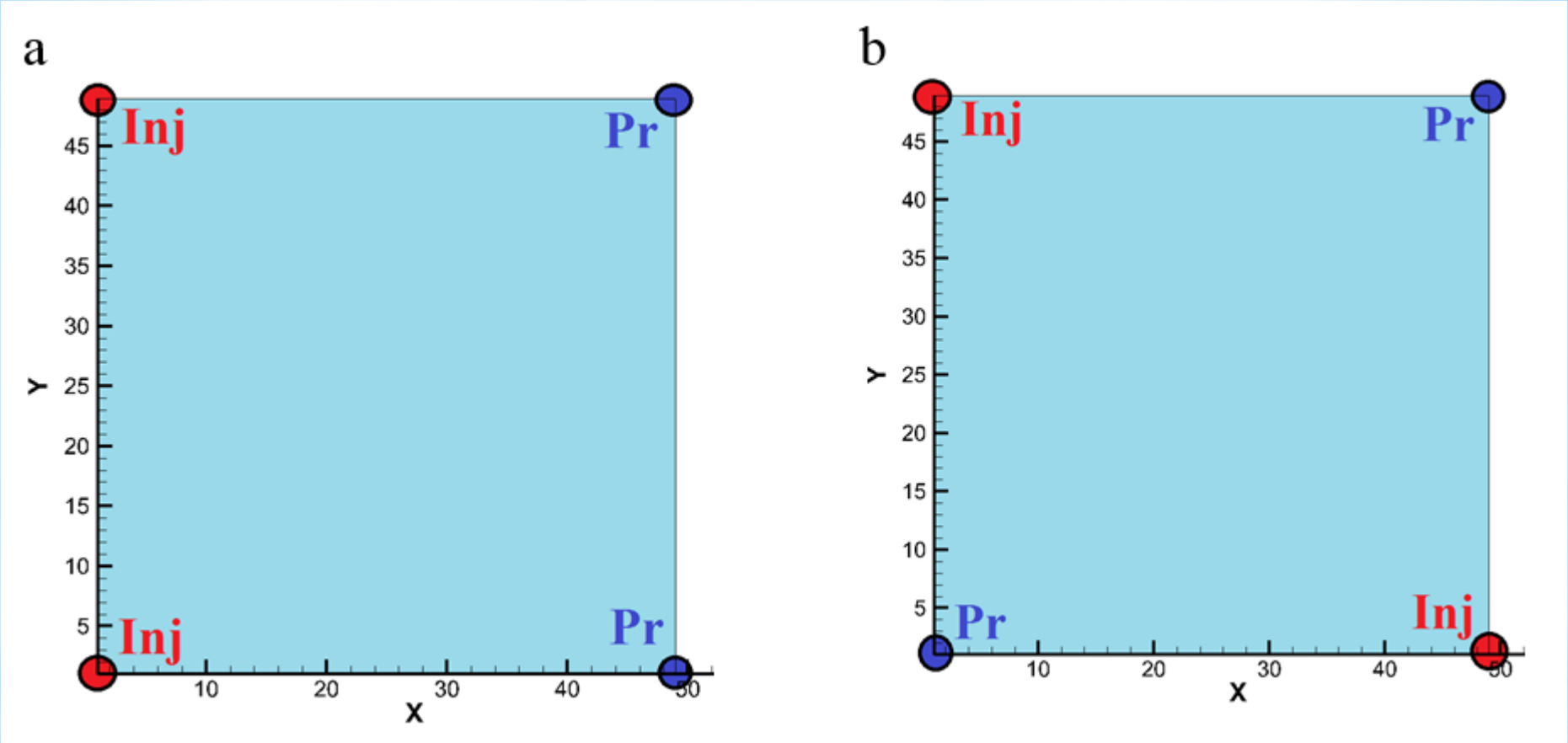
Біртекті емес ортаның көлденең қимасындағы алғашқы уақыттағы қатты минералдың(a), күкірт қышқылының (b), белгілі бір уақыт өткеннен кейінгі күкірт қышқылының таралғанынан кейінгі қатты минералдың (c) және еріген минералдың (d) таралуы көрсетілген

Ағынсызықтар әдісінде сандық дифузияның болмауы





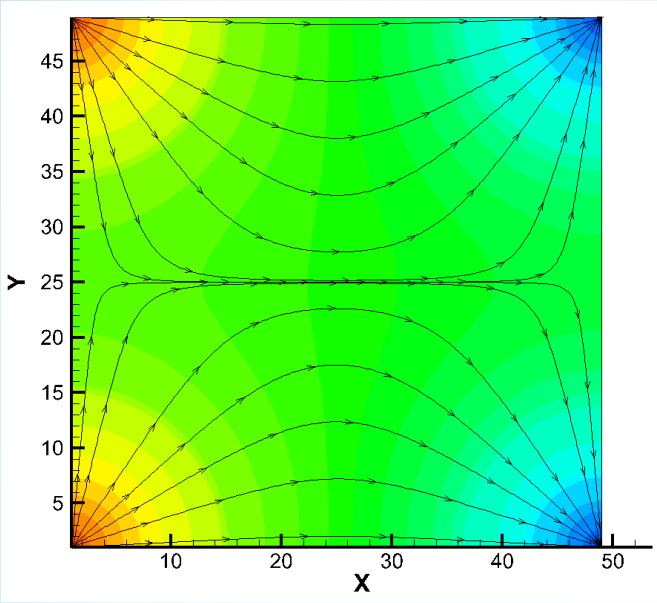
СТАЦИОНАРЛЫ ЕМЕС ФИЛЬТРАЦИЯЛЫҚ ПРОЦЕССКЕ АҒЫН СЫЗЫҚ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ

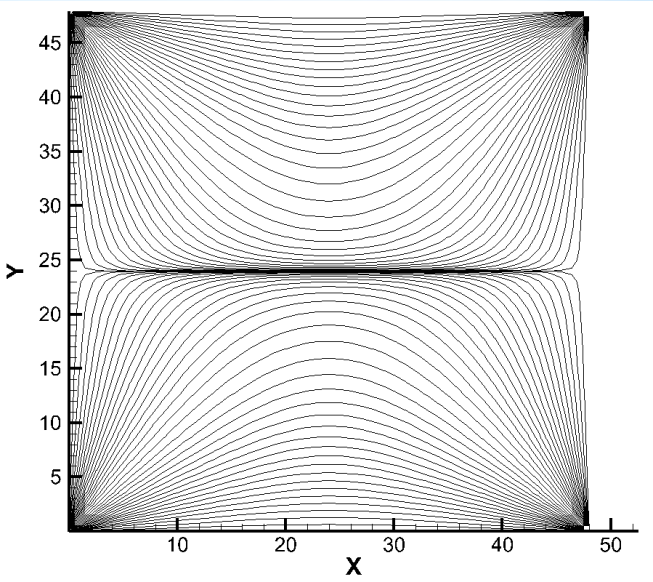


Алғашқы уақыттағы(a) және белгілі бір уақыттан кейінгі(b) ұңғылардың орналасуы

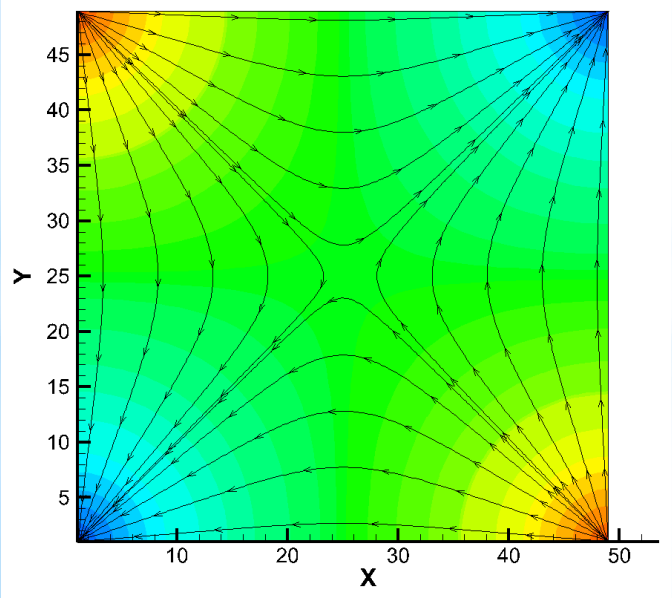
Стационар емес есебі

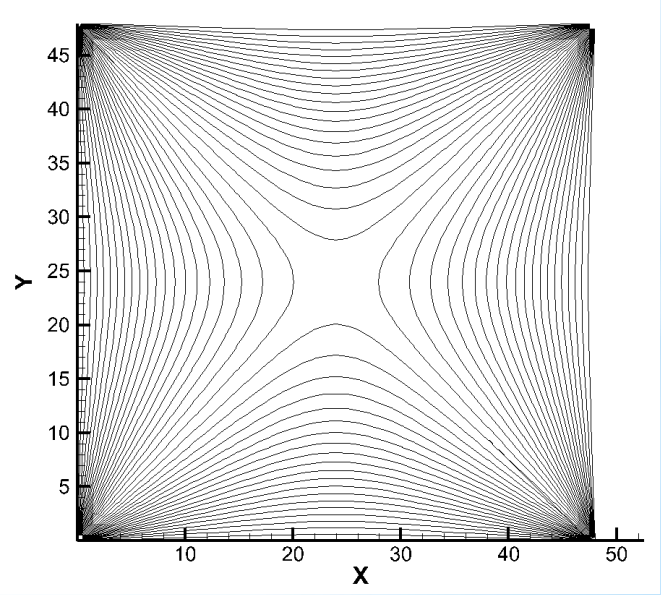
1)

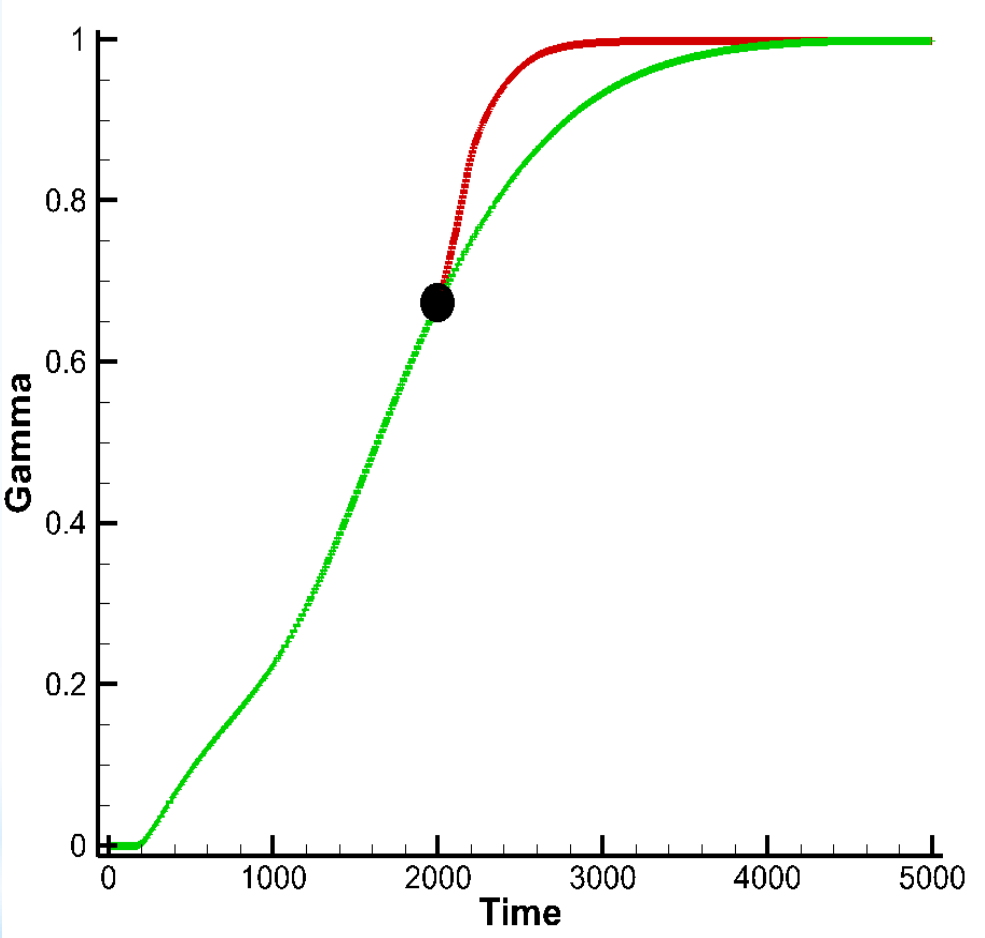




2)







Өндіру дәреженің уақытқа тәуелділігі

Пибликациялар тізімі

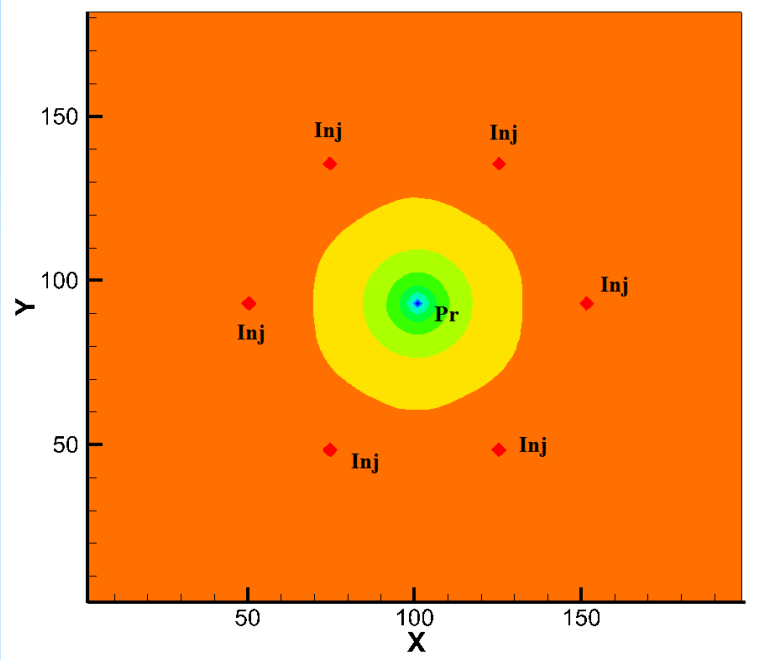
- 2014ж, №1 (51) Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясының хабаршысы
- 2014ж, Студенттер мен жас ғалымдардың «Ғылым және білім - 2014» атты IX Халықаралық ғылыми конференциясыны
- 2014ж, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ 80-жылдығына орай студенттер мен жас ғалымдардың «Фараби әлемі» атты халықаралық ғылыми конференциясы
- 2015ж, Ұлы отан соғысы жеңісінің 70 жылдығына арналған студенттер мен жас ғалымдардың «Фараби әлемі» атты халықаралық ғылыми конференциясы
- 2015ж, математика және механика институтының 50 жылдығына арналған «математиканың және математикалық модельдеудің актуальды мәселелері» атты халықаралық ғылыми конференциясы

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

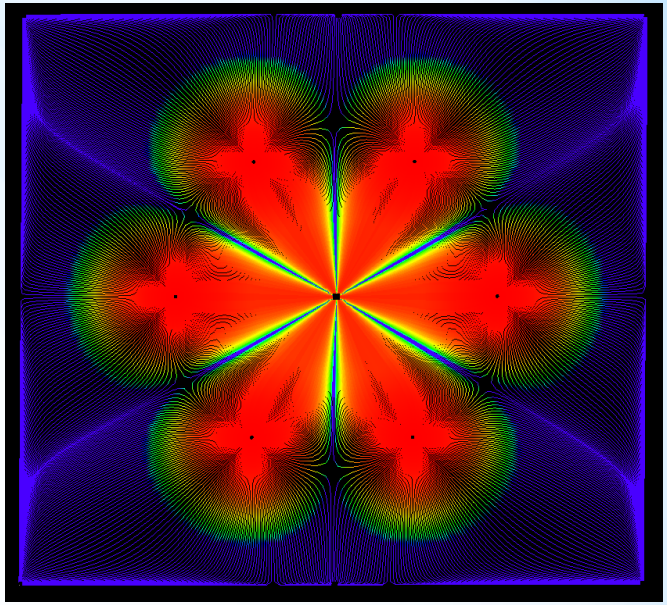
1. Белецкий, В.И., Богатков, Л.К., Волков, Н.И. и др. Справочник по геотехнологии урана. / под. ред. Д.И. Скороварова. – Москва: Энергоатомиздат, 1997. – 672 с.
2. Данаев, Н.Т., Корсакова, Н.К., Пеньковский, В.И. Массоперенос в прискважинной зоне и электромагнитный каротаж пласта. – Алматы: Қазақуниверситеті, 2005. – 180 с.
3. AkhilDatta-Gupta, Michael J. King Streamline simulation: Theory and Practice. - Society of Petroleum Engineers, 2007. - 397 P.
4. Blunt, M.J., Lui, K., Thiele, M.R. - A generalized Streamline Method to Predict Reservoir Flow, - Petroleum Geoscience, 2, 1996, 259-269.
5. Oladyshkin, S., Royer, J. J., and Panfilov, M., - Effective solution through the streamline technique and HT-splitting for the 3D dynamic analysis of the compositional flows in oil reservoirs Transport in Porous Media, 74(3), 2008, 311-329.
6. Bratvedt, F., Gimse, T., Tegnander, C. - Streamline Computation for Porous Media Flow including Gravity, Transport in Porous Media, 25(1), 1996, 63-78.
7. Pollock, D. W. - Semi-analytical Computation of Path Line for Finite Difference Models. Ground Water, 26(6), 1988, 743-750
8. Datta-Gupta, A., King, M.J. - Streamline Simulation: Theory and Practice, - SPE Textbook Series, vol. 11, Textbook, 2007, - 394.
9. Batycky, R. P. - A three-dimensionnal two-phase two-phase field scale streamline simulator, PhD Thesis submitted to the department of petroleum engineering, Stanford University, 1997.
10. Chung, T.J - Computational Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 2006, 1012.

Гексагон

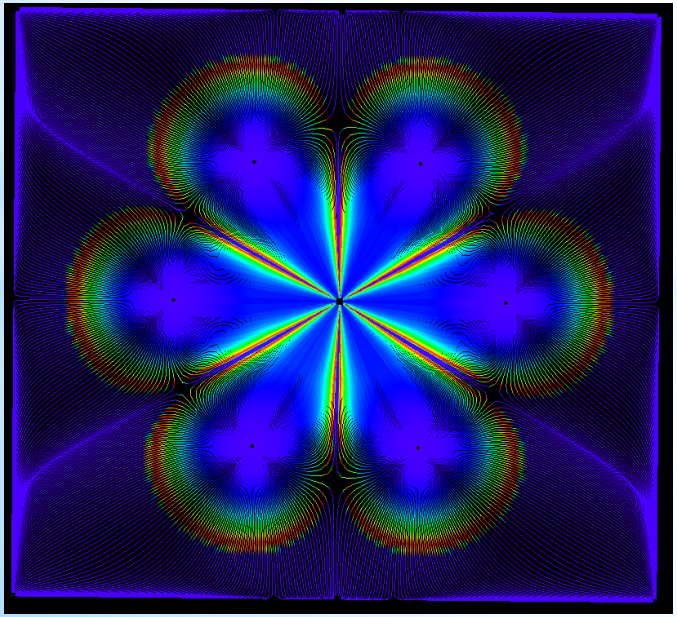
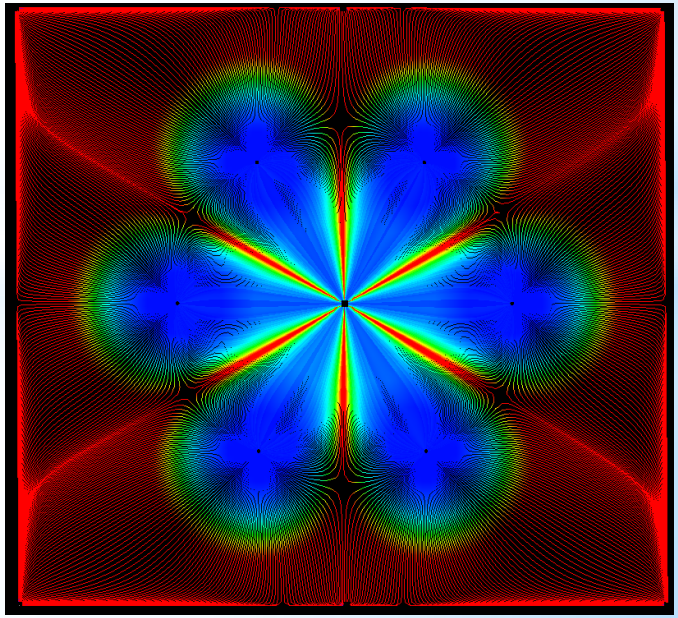
Гидравликалық қысым



Күкірт қышқылы (реагент)



Сұйық фазадағы уран



Қатты фазадағы уран (минерал)