

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1. Постановка задачи моделирования роста трещин автоГРП в длину	4
2. Описание численного алгоритма решения	7
3. Результаты моделирования.....	8
Заключение	15
Список использованных источников	16

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором, влияющим на эффективность добычи углеводородов при разработке месторождения, является система заводнения, которая организуется с целью поддержания пластового давления (ППД) и увеличения нефтеотдачи пласта. Часто при организации системы заводнения осуществляют перевод добывающих скважин, отработавших на истощение, в нагнетание. Поскольку нагнетание производится с большим расходом и давление жидкости, как правило, превышает давление разрыва породы, то на таких скважинах возникает риск инициации самопроизвольного роста техногенных трещин. Данное явление называется эффектом автоГРП, а длина трещин автоГРП может варьироваться от десятков метров до километра и более.

На момент перевода в нагнетание большинство эксплуатационного фонда скважин было ранее (во время работы в добывающем фонде) простимулировано многостадийным гидроразрывом пласта. На таких скважинах может инициироваться одновременный рост нескольких трещин автоГРП (по одной трещине из каждого порта ранее проведённого многостадийного гидроразрыва).

Неконтролируемый рост трещины автоГРП может привести к негативным последствиям, которые зависят от геометрических размеров и ориентации трещины и заключаются в том, что развитие трещины может стать причиной обводнения добывающих скважин, а также причиной прорыва воды в верхние или нижние горизонты, что снижает эффективность эксплуатации месторождения.

С другой стороны, контролируемый рост трещин автоГРП может значительно увеличить приёмистость нагнетательных скважин и существенно повысить эффективность заводнения, что приведёт к увеличению эффективности эксплуатации месторождения [1; 3].

Чтобы проводить грамотный контроль роста трещин автоГРП и снизить риски их неконтролируемого распространения важно научиться моделировать одновременный рост нескольких трещин автоГРП в длину.

Целью данной работы является моделирование перераспределения потоков между несколькими трещинами автоГРП. В качестве базовой модели трещины выбрана модель Перкинса-Керна-Нордгрена, для которой в работе [6] представлены приближённые решения во всём параметрическом

пространстве и точные аналитические решения в предельных случаях. Также на практике используют модель Христиановича-Желтова-Гиртсма-деКлерка [5] и радиальную модель [4] трещин ГРП, но они менее точны при моделировании роста трещин автоГРП, так как используют дополнительные предположения, которые не соответствуют процессу роста трещин на нагнетательных скважинах.

Объектом исследования является горизонтальная нагнетательная скважина, на которой ранее (когда она работала в добывающем фонде) был проведён многостадийный гидроразрыв. Предметом исследования являются забойное давление на рассматриваемой скважине и расходы воды на каждой из трещин при заданном расходе воды на забое.

В данном отчёте представлены численная реализация алгоритма расчёта полудлин одновременно растущих трещин автоГРП с использованием полных производных формул Кёнинга [9] по времени (рассматриваются первая формула Кёнинга для случая одномерных утечек жидкости по Картеру [8] и вторая формула Кёнинга в случае двумерных радиальных утечек жидкости из трещины в пласт), а также проведён анализ полученных результатов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОСТА ТРЕЩИН АВТОГРП В ДЛИНУ

На основе модели одномерных утечек Картера [8] в работе [9] получена первая формула Кёнинга, которая представляет собой зависимость полудлины трещины автоГРП от расхода жидкости, фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) пласта, репрессии на пласт и времени:

$$x_f = \frac{Q\mu\sqrt{\pi\kappa t}}{2\pi k_e h (p_f - p_e)}, \quad (1.1)$$

где Q – расход нагнетаемой в рассматриваемую трещину жидкости; μ – вязкость жидкости; $\kappa = k_e/(\varphi_e \mu c_t)$ – коэффициент пьезопроводности пласта; t – время закачки; k_e – проницаемость пласта; φ_e – пористость пласта; c_t – общая сжимаемость системы (состоит из сжимаемости флюидов и сжимаемости порового пространства); h – эффективная толщина (мощность) пласта; $\Delta p = p_f - p_e$ – разница между средним давлением в трещине и пластовым давлением (репрессия на пласт).

В текущей работе рассматривается одновременный рост нескольких трещин гидроразрыва, поэтому расход жидкости на каждой из них может динамично меняться согласно правилам Кирхгофа. Кроме того, давление в трещинах в общем случае тоже может меняться по мере увеличения объёма трещин и изменения расхода на них. Получается, что согласно формуле (1.1) есть зависимость полудлины трещины x_f от расхода на трещине Q , но при этом на расход в общем случае может влиять текущая полудлина каждой из трещин.

Таким образом, для корректного применения формулы Кёнинга приращение полудлины каждой из трещин на текущем шаге по времени необходимо найти как произведение полной производной формулы Кёнинга по времени и рассматриваемого временного шага.

Полная производная полудлины трещины x_f по времени t :

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{\partial x_f}{\partial t} + \frac{\partial x_f}{\partial Q} \frac{dQ}{dt} + \frac{\partial x_f}{\partial (p_f - p_e)} \frac{d(p_f - p_e)}{dt} \quad (1.2)$$

Частная производная полудлины трещины x_f по времени t :

$$\frac{\partial x_f}{\partial t} = \frac{Q\mu}{4\pi k_e h (p_f - p_e)} \sqrt{\frac{\pi\kappa}{t}} \quad (1.3)$$

Частная производная полудлины трещины x_f по расходу Q :

$$\frac{\partial x_f}{\partial Q} = \frac{\mu \sqrt{\pi \kappa t}}{2\pi k_e h (p_f - p_e)} \quad (1.4)$$

Частная производная полудлины трещины x_f по репрессии на пласт $(p_f - p_e)$:

$$\frac{\partial x_f}{\partial (p_f - p_e)} = -\frac{Q \mu \sqrt{\pi \kappa t}}{2\pi k_e h (p_f - p_e)^2} \quad (1.5)$$

Подставляя (1.3), (1.4) и (1.5) в выражение (1.2), получаем:

$$\frac{dx_f}{dt} = \frac{\mu}{2\pi k_e h (p_f - p_e)} \left(\frac{Q}{2} \sqrt{\frac{\pi \kappa}{t}} + \sqrt{\pi \kappa t} \frac{dQ}{dt} - \frac{Q \sqrt{\pi \kappa t}}{(p_f - p_e)} \frac{d(p_f - p_e)}{dt} \right) \quad (1.6)$$

Итак, приращение полудлины трещины на каждом шаге по времени при рассмотрении случая одномерных утечек Картера записывается в следующем виде:

$$dx_f = \frac{\mu}{2\pi k_e h (p_f - p_e)} \left(\frac{Q}{2} \sqrt{\frac{\pi \kappa}{t}} dt + \sqrt{\pi \kappa t} dQ - \frac{Q \sqrt{\pi \kappa t}}{(p_f - p_e)} d(p_f - p_e) \right) \quad (1.7)$$

Дополнительно в работе [9] получена вторая формула Кёнинга, которая применяется в случае двумерных радиальных утечек жидкости из трещины в пласт и представляет собой зависимость полудлины трещины автоГРП от расхода жидкости, фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) пласта, репрессии на пласт и времени:

$$x_f = 3 \exp\left(-\frac{2\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q \mu}\right) \sqrt{\kappa t} \quad (1.8)$$

В этом случае частная производная полудлины трещины x_f по времени t :

$$\frac{\partial x_f}{\partial t} = \frac{3}{2} \exp\left(-\frac{2\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q \mu}\right) \sqrt{\frac{\kappa}{t}} \quad (1.9)$$

Частная производная полудлины трещины x_f по расходу Q :

$$\frac{\partial x_f}{\partial Q} = \frac{6\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q^2 \mu} \exp\left(-\frac{2\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q \mu}\right) \sqrt{\kappa t} \quad (1.10)$$

Частная производная полудлины трещины x_f по репрессии на пласт $(p_f - p_e)$:

$$\frac{\partial x_f}{\partial (p_f - p_e)} = -\frac{6\pi k_e h}{Q \mu} \exp\left(-\frac{2\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q \mu}\right) \sqrt{\kappa t} \quad (1.11)$$

Подставляя (1.9), (1.10) и (1.11) в выражение (1.2), получаем:

$$\begin{aligned} \frac{dx_f}{dt} = & \exp\left(-\frac{2\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q\mu}\right) \left(\frac{3}{2} \sqrt{\frac{\kappa}{t}} + \right. \\ & \left. + \frac{6\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q^2 \mu} \sqrt{\kappa t} \frac{dQ}{dt} - \frac{6\pi k_e h}{Q\mu} \sqrt{\kappa t} \frac{d(p_f - p_e)}{dt} \right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

Итак, приращение полудлины трещины на каждом шаге по времени при рассмотрении случая двумерных радиальных утечек жидкости из трещины в пласт записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} dx_f = & \exp\left(-\frac{2\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q\mu}\right) \left(\frac{3}{2} \sqrt{\frac{\kappa}{t}} dt + \right. \\ & \left. + \frac{6\pi k_e h (p_f - p_e)}{Q^2 \mu} \sqrt{\kappa t} dQ - \frac{6\pi k_e h}{Q\mu} \sqrt{\kappa t} d(p_f - p_e) \right) \end{aligned} \quad (1.13)$$

Постановка задачи принимает следующий вид: используя решатель уравнений Кирхгофа и формулы для приращения полудлины трещины (1.7) и (1.13), построить графики зависимостей полудлины трещины и расхода на трещинах от времени при одномерных утечках Картера и при двумерных радиальных утечках жидкости из трещины в пласт.

2. ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ

Совмещение формулы Кёнинга с уравнениями Кирхгофа проводится следующим образом:

- 1) на текущем шаге по времени по имеющимся значениям полудлины трещин автоГРП предыдущего шага рассчитываются давления и расходы на каждой трещине;
- 2) на основе полученных значений приращений давления и расхода рассчитывается приращение полудлины трещины dx_f на данном временном шаге по формуле (1.7) в случае одномерных утечек Картера и по формуле (1.13) в случае двумерных радиальных утечек жидкости из трещины в пласт;
- 3) по формуле $x_f^{\text{current}} = x_f^{\text{last}} + dx_f$ рассчитываются полудлины каждой из трещин на текущем временном шаге;
- 4) описанные действия повторяются до требуемого шага по времени (условия остановки).

На рис. 2.1 этот алгоритм расчёта полудлин растущих трещин автоГРП представлен в виде блок-схемы.

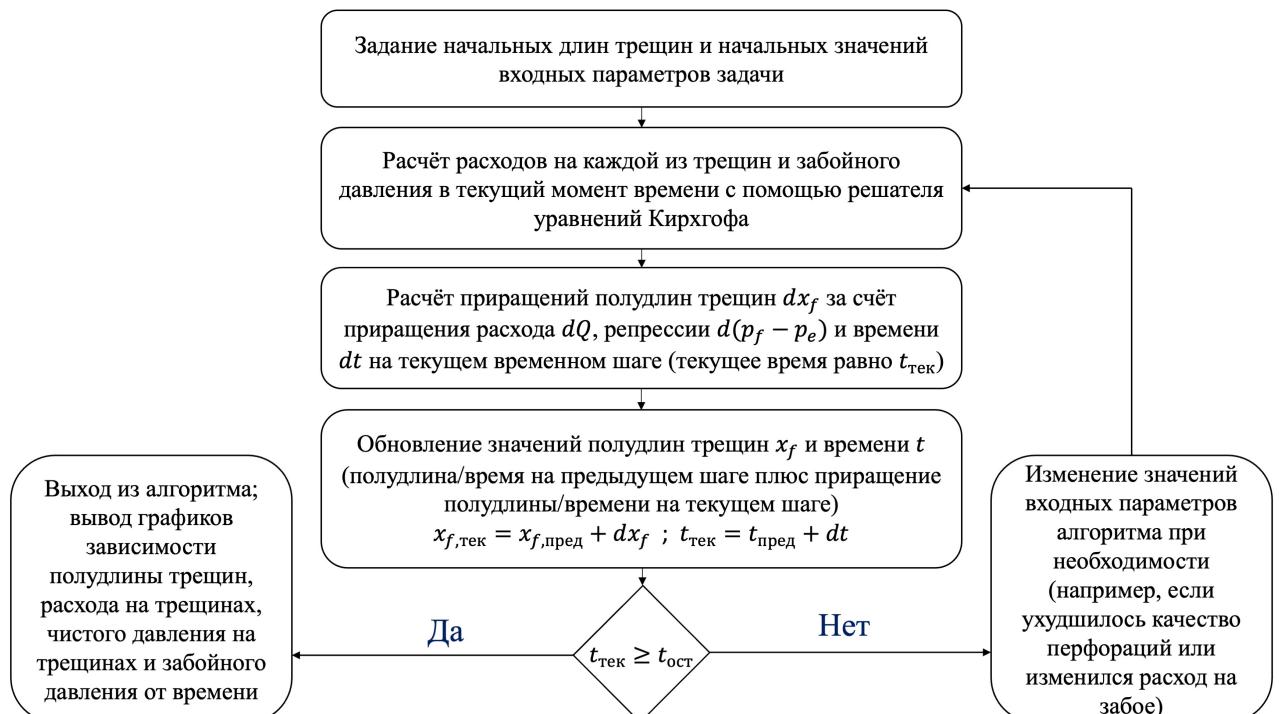


Рис.2.1. Алгоритм расчёта полудлин трещин в зависимости от времени

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Значения входных параметров, выбранные перед запуском алгоритма представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Значения входных параметров алгоритма расчёта полудлины трещин

Параметр	Значение
Расход на забое Q_0	1000 м ³ /сут
Вязкость закачиваемой жидкости (воды) μ	10 ⁻³ Па·с
Плотность закачиваемой жидкости (воды) ρ	1000 кг/м ³
Проницаемость пласта k_e	1 мД
Пористость пласта φ_e	0.2
Общая сжимаемость c_t	2.2 · 10 ⁻⁹ Па ⁻¹
Пластовое давление p_e	25 МПа
Модуль плоской деформации породы E'	10 ⁴ МПа
Мощность (высота) пласта H	15 м
Количество перфораций n_p	32
Диаметр перфораций d_p	0.02 м
Безразмерный коэффициент эрозии C_d	0.5
Радиус участков трубы R	0.08 м
Длина участков трубы L	100 м
Давление смыкания $\sigma_{\min} = \sigma_0$	40 МПа
Трещиностойкость породы K_{Ic}	10 ⁶ Па·м ^{1/2}
Количество трещин	4

На рис. 3.1 представлены результаты моделирования роста трещин автоГРП при выбранных значениях параметров (см. табл. 3.1) в случае одномерных утечек Картера.

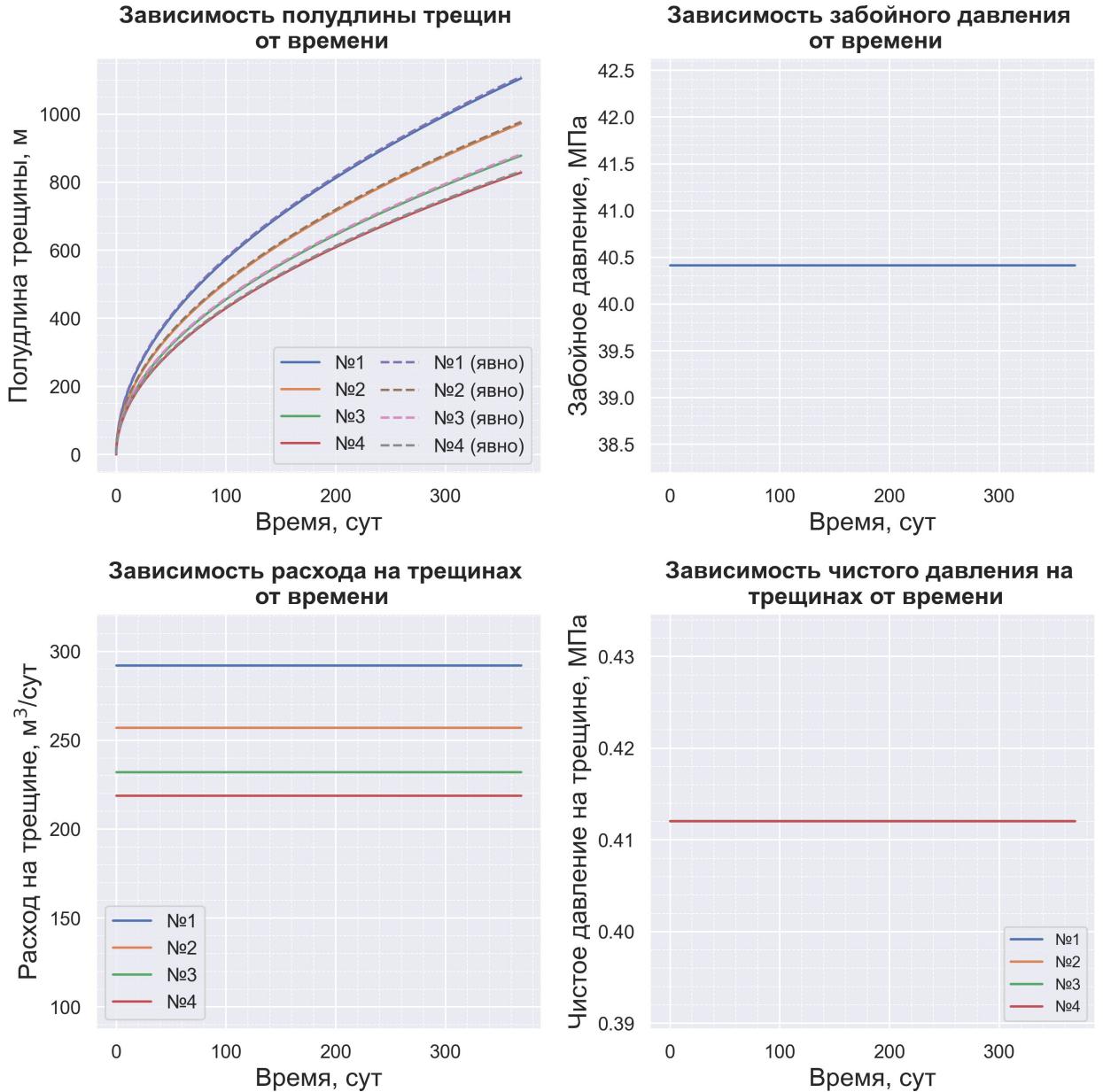


Рис.3.1. Результаты моделирования перераспределения потоков и роста трещин автоГРП в случае одномерных утечек Картера при выбранных значениях входных параметров

Видим, что расходы на трещинах постоянны и длина трещин растёт согласно первой формуле Кёнинга (1.1). Чистое давление в трещинах постоянно, так как предполагается, что все трещины распространяются и давление в них равно давлению распространения трещин РКН. Забойное давление также постоянно, так как расходы (и соответственно перепады давления на трение в трубе и на перфорациях) не меняются со временем.

Такой же эксперимент при выбранных значениях параметров (см. табл. 3.1) проведён в случае двумерных радиальных утечек жидкости из трещины в пласт. Результаты представлены на рис. 3.2.

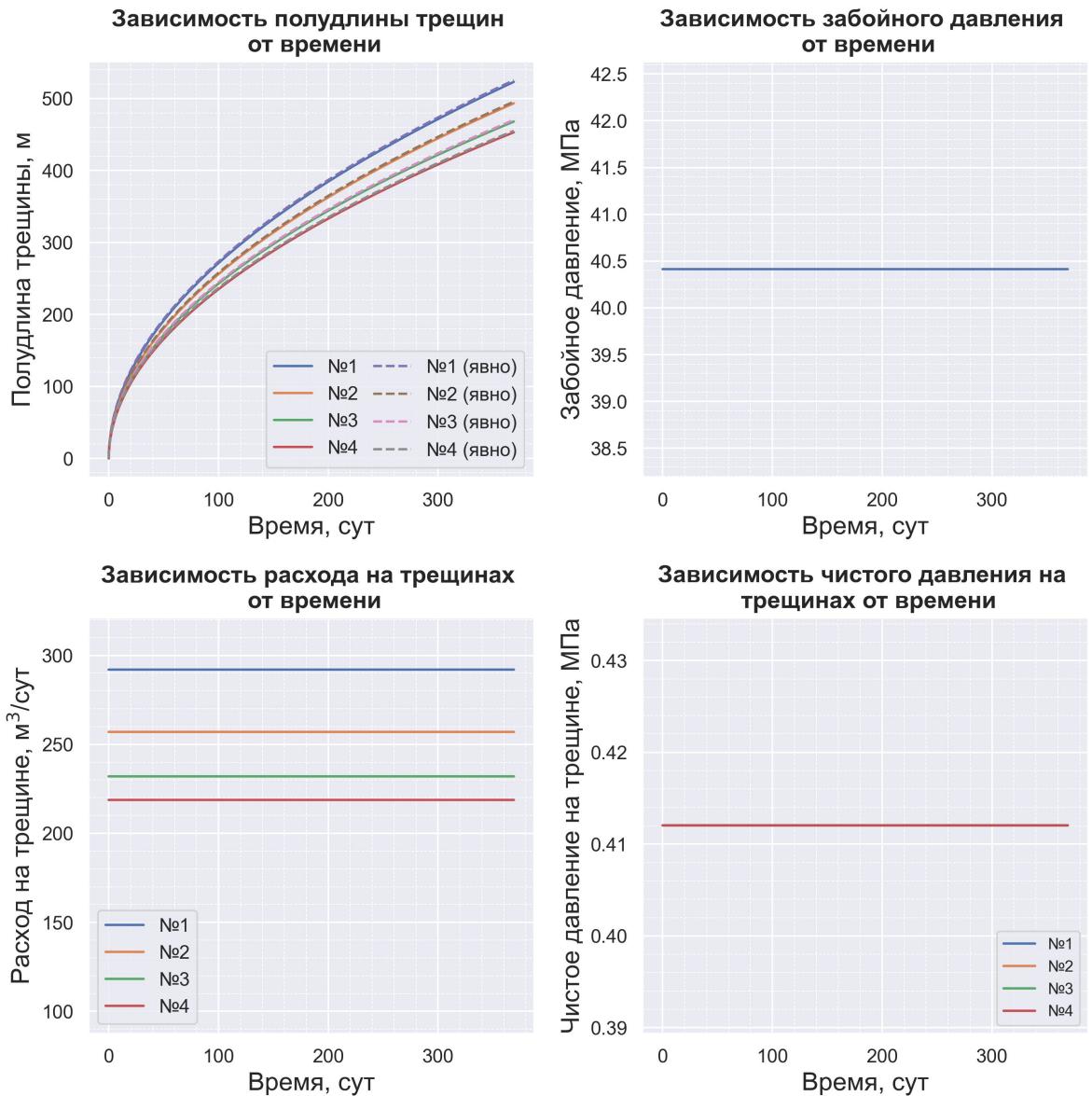


Рис.3.2. Результаты моделирования перераспределения потоков и роста трещин автоГРП в случае двумерных радиальных утечек жидкости из трещины при выбранных значениях входных параметров

В этом случае (см. рис. 3.2) трещины растут по второй формуле Кёнинга (1.8) и их длина в каждый момент времени меньше, чем длина, полученная в случае одномерных утечек Картера, что согласуется с результатами работы [7].

Таким образом, предположение одномерности утечек по Картеру [8] может завышать оценку для длины растущих трещин автоГРП.

При ухудшении качества перфораций на второй, третьей и четвёртой трещинах наблюдается интересная картина (см. рис. 3.3 и рис. 3.4) стремительного роста первой трещины, на которой качество перфораций не

изменяется. Особенно сильно этот эффект заметен в случае одномерных утечек Картера.

Диаметр перфораций на второй, третьей и четвёртой трещинах изменялся по следующим формулам:

$$d_{p,2}(t) = 0.02 \text{ м} - 0.015 \text{ м} \cdot \left(\frac{t}{365 \text{ сут}} \right) \quad (3.1)$$

$$d_{p,3}(t) = 0.02 \text{ м} - 0.010 \text{ м} \cdot \left(\frac{t}{365 \text{ сут}} \right) \quad (3.2)$$

$$d_{p,4}(t) = 0.02 \text{ м} - 0.005 \text{ м} \cdot \left(\frac{t}{365 \text{ сут}} \right) \quad (3.3)$$

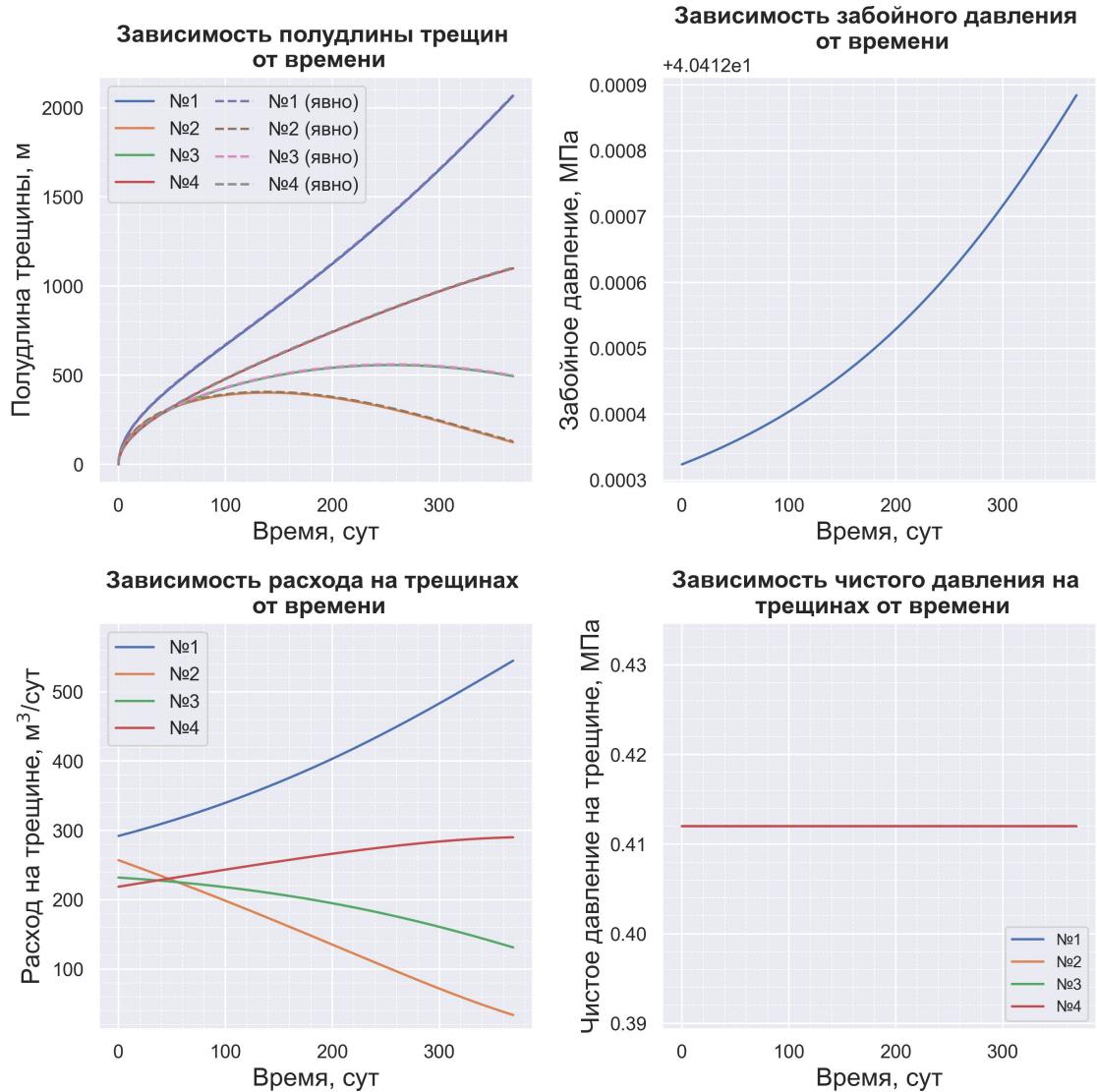


Рис.3.3. Результаты моделирования перераспределения потоков и роста трещин автоГРП при уменьшении диаметра перфораций на второй, третьей и четвёртой трещинах – режим утечек Картера

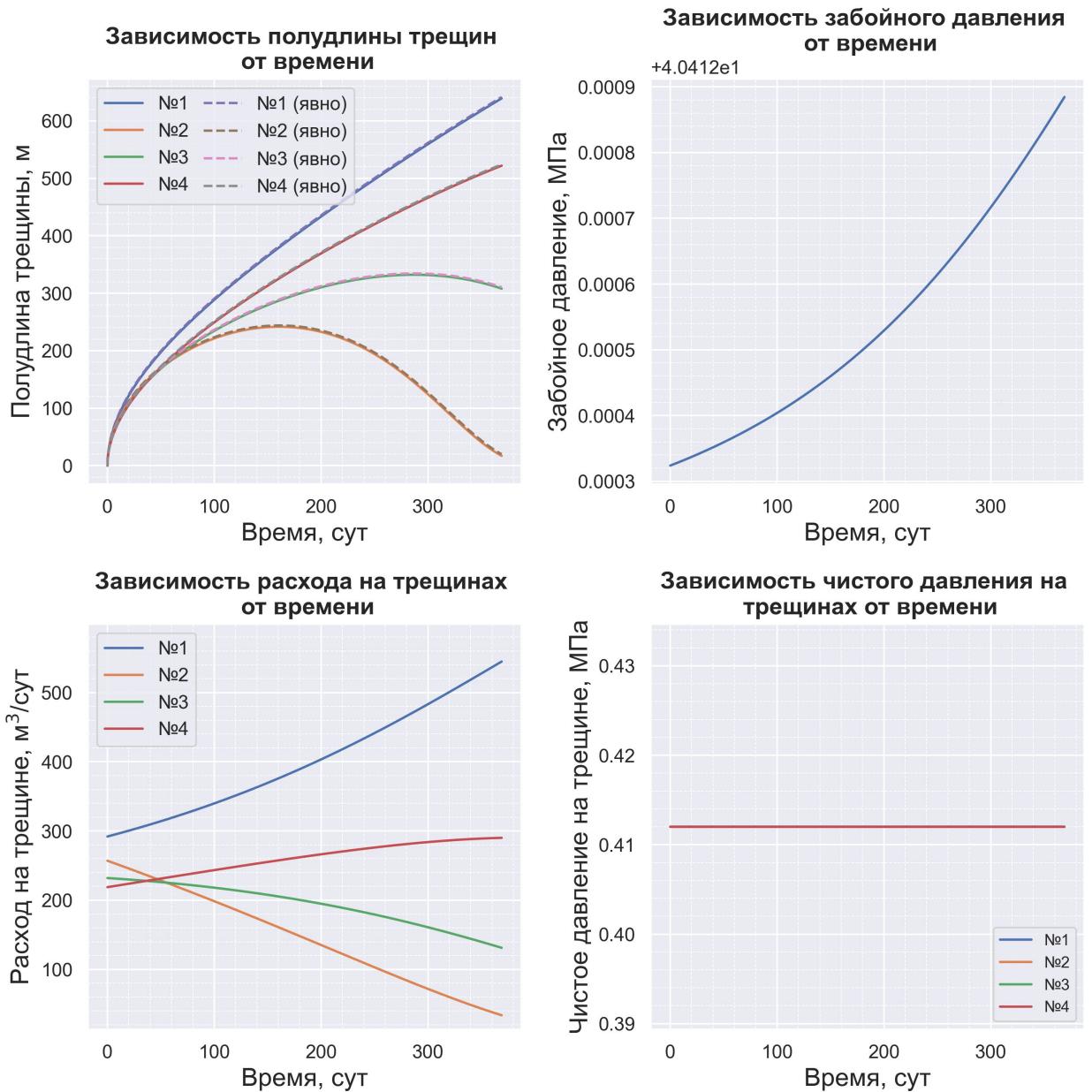


Рис.3.4. Результаты моделирования перераспределения потоков и роста трещин автоГРП при уменьшении диаметра перфораций на второй, третьей и четвёртой трещинах – двумерный радиальный режим утечек жидкости из трещины в пласт

Далее проведён эксперимент при уменьшении горизонтальных напряжений пласта со временем (за счёт термоупругого воздействия – например, в пласт закачивается холодная вода). Результаты представлены на рис. 3.5 и 3.6. Минимальное горизонтальное напряжение в пласте в этом эксперименте изменялось по формуле:

$$\sigma_{\min}(t) = 40 \text{ МПа} - 5 \text{ МПа} \cdot \left(\frac{t}{365 \text{ сут}} \right) \quad (3.4)$$

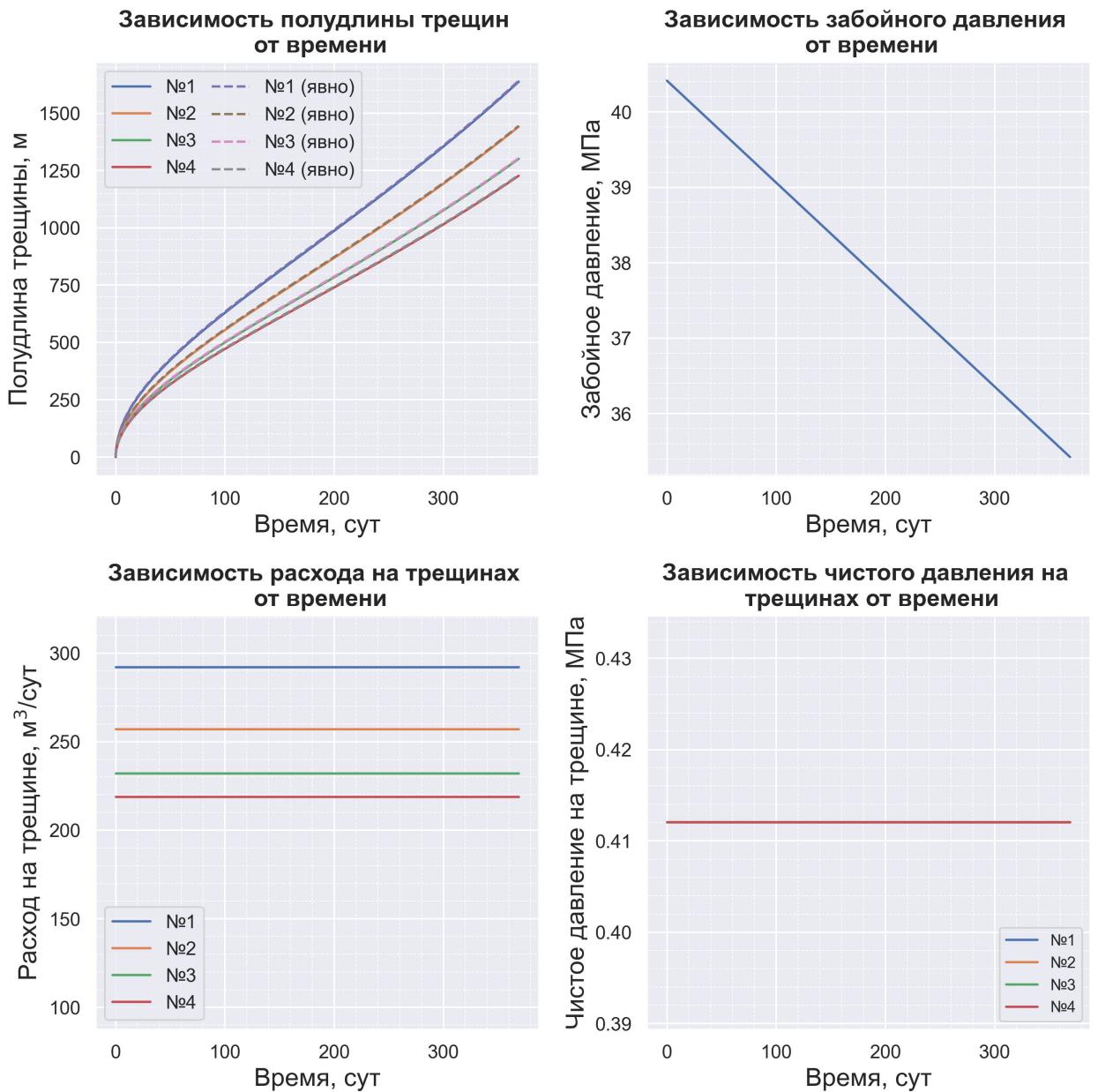


Рис.3.5. Результаты моделирования перераспределения потоков и роста трещин автоГРП при термоупругом воздействии (уменьшении горизонтальных напряжений в пласте) – режим утечек Картера

Из рис. 3.5 и рис. 3.6 видим, что термоупругое уменьшение горизонтальных напряжений пласта приводит к более длинным трещинам (по сравнению с базовым сценарием рис. 3.1 и 3.2), что согласуется с результатами работы [11].

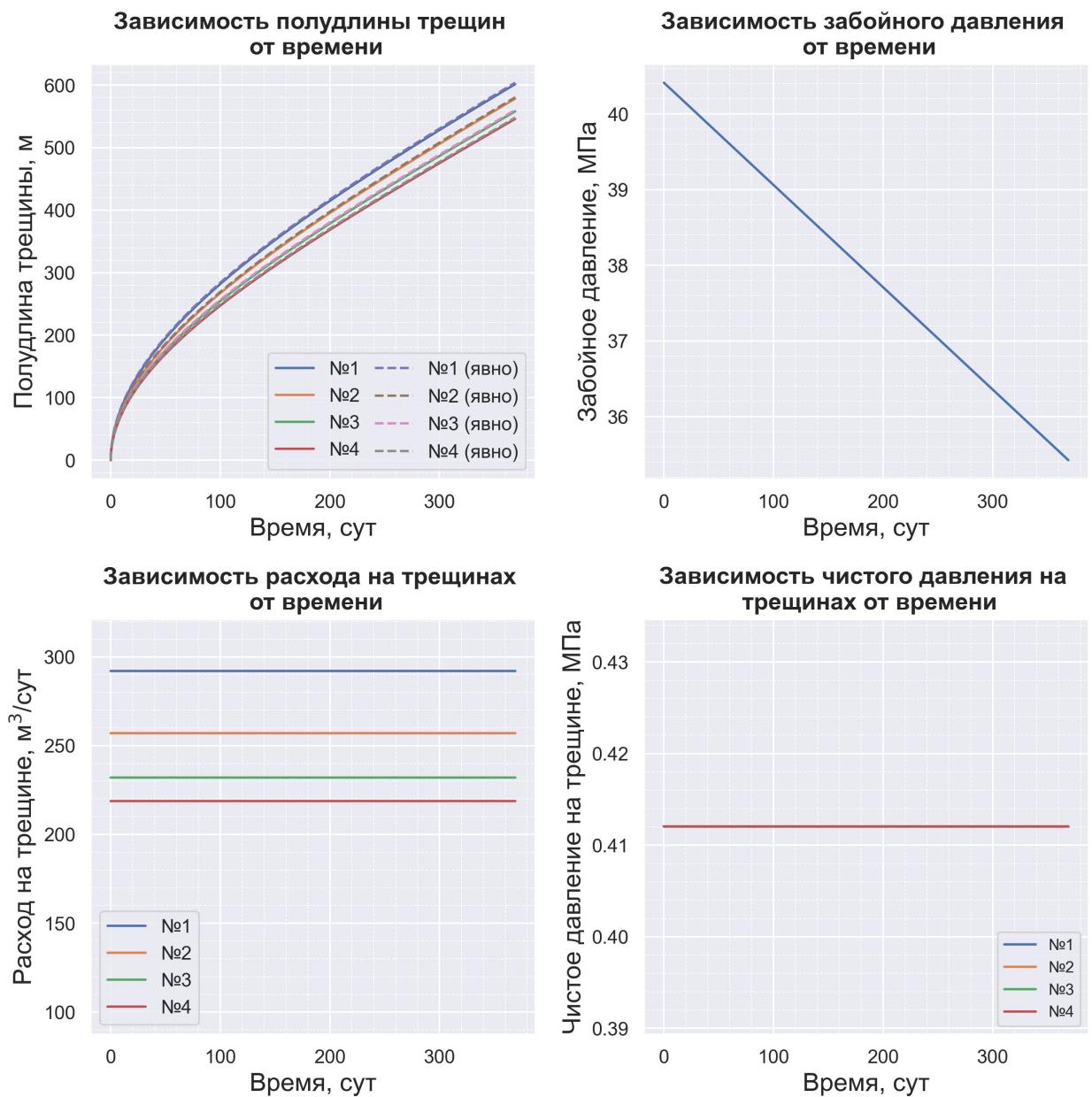


Рис.3.6. Результаты моделирования перераспределения потоков и роста трещин автоГРП при термоупругом воздействии (уменьшении горизонтальных напряжений в пласте) – двумерный радиальный режим утечек жидкости из трещины в пласт

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на основе формул Кёнига найдены формулы для приращения полудлины трещин в случае одномерных утечек Картера и в случае двумерных радиальных утечек жидкости из трещины в пласт. Проведено совмещение формул Кёнига с решателем уравнений Кирхгофа, а именно построена модель роста нескольких трещин автоГРП с учётом перераспределения потоков между ними при изменении входных параметров, определяющих физическое состояние породы скважины и трещин, со временем.

Проведён анализ зависимости полудлины каждой из трещин, забойного давления и расходов жидкости на каждой из трещин от времени при различных сценариях изменения входных параметров со временем. Сделаны следующие выводы:

- предположение одномерности утечек жидкости из трещины в пласт по Картеру может завышать значения полудлин растущих трещин автоГРП;
- уменьшение диаметра перфораций на одной из трещин приводит к постепенному закрытию этой трещины и одновременному более интенсивному росту соседних трещин;
- термоупругое уменьшение горизонтальных напряжений в пласте (например, при охлаждение породы в случае закачки холодной воды) приводит к более интенсивному росту трещин автоГРП.

В дальнейшем необходимо дополнить построенную модель, а именно обратить особое внимание на эффекты пороупругости, когда большие утечки жидкости из трещины в пласт влияют на упругое состояние породы и тем самым влияют на направление и темп изменения длины соседних трещин. Учёт этих эффектов важен, так как может приводить к внезапному закрытию трещин автоГРП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Базыров И. Ш., Шель Е. В., Хасанов М. М. Анализ эффективности заводнения низкопроницаемых коллекторов нагнетательными горизонтальными скважинами с поперечными трещинами многостадийного ГРП. — PROнефть, сентябрь 2020. — DOI 10.7868/S258773992002007X.
2. Байков В. А., Давлетбаев А. Я., Асмандияров Р. Н. Специальные гидродинамические исследования для мониторинга за развитием трещин ГРП на нагнетательных скважинах. — Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» №1, 2011. — С. 65-75.
3. Якупов И. Я., Егоров Е. Л., Родионова И. И., Мироненко А. А., Искеевич И. Г., Мирошниченко В. П., Сергейчев А. В. Разработка низкопроницаемых объектов Приобского месторождения в условиях образования техногенных трещин автоГРП. — Экспозиция Нефть Газ №5 (90), 2022.
4. Dontsov E. V. An approximate solution for a penny-shaped hydraulic fracture that accounts for fracture toughness, fluid viscosity, and leak-off. — R. Soc. open sci., 3:160737, 2016.
5. Dontsov E. V. An approximate solution for a plane strain hydraulic fracture that accounts for fracture toughness, fluid viscosity, and leak-off. — Int. J. Fract., 205, 2017. — 221-237.
6. Dontsov E. V. Analysis of a constant height hydraulic fracture. — 2021. — arXiv: 2110.13088 [https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.13088].
7. Hagoort J., Weatherill B. D., Settari A. Modeling the Propagation of Waterflood-Induced Hydraulic Fractures. — SPE, 1980.
8. Karter R. D. Derivation of the general equation for estimating the extent of the fractured area. — Appendix of “Optimum Fluid Characteristics for Fracture Extension”, by Howard G.C, Fast C.R., 1957. — 261-268 p.
9. Koning E. J. L. Fractured water-injection wells. Analytical modelling of fracture propagation. — Petroleum Development Oman LLC, 1985.
10. Nordgren R. P. Propagation of a Vertical Hydraulic Fracture. — SPE 89, August 1972. — P. 306-314.
11. Perkins T. K., Gonzalez J. A. The Effect of Thermoelastic Stresses on Injection Well Fracturing. — SPE, February 1985.
12. Perkins T., Kern L. Widths of hydraulic fractures. — SPE 89, September 1961. — P. 937 – 949.