

Р.И. Пашкевич, А.В. Шадрин

**РАСПАД РАЗРЫВА В ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
ПРИ НАДКРИТИЧЕСКИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
УСЛОВИЯХ**

Представлены результаты численного решения задачи распада разрыва в геотермальной системе при начальных надкритических термодинамических условиях на базе программного комплекса AUTOUGH 2.2 Supercritical.

Ключевые слова: распад разрыва, численное моделирование, надкритические термодинамические условия, геотермальная система.

1 Введение

В работах [1,2] рассматривались гидротермальные процессы, связанные с движением флюидов через границу пластичных и хрупких пород в маग्магеотермальных системах. Фурнье объяснил переход от гидростатического давления к большему, чем гидростатическое [1], а также разработал физическую модель перехода от магматических к эпитеермальным условиям в приповерхностной субвулканических окружающих породах [2]. Модель Фурнье сводится к следующему. В верхней части системы метеорные воды циркулируют при гидростатическом давлении в хрупкой породе при температуре меньшей 370°C, т.е. температуре, меньшей критической для воды. Рассол и газ, выделяющиеся из кристаллизующейся магмы накапливаются в тонких ступенчатых горизонтальных линзах в пластичных породах при литостатическом давлении, где наименьшее главное напряжение является литостатической нагрузкой. В местах неоднократного внедрения магматических тел, на относительно близповерхностных глубинах образуются большие объемы пластичной породы с температурой 400-500°C и существует вязко-пластичная граница раздела на глубинах 1—2 км. Сочетание выпадения жильных минералов в результате нагревания до температуры более 350°C на стороне низкого давле-

ния и низкой температуры, и пластической текучести и отложения жильных минералов при декомпрессии на стороне высокого давления и высокой температуры создает на этой границе раздела самоуплотняющуюся зону. Градиенты температуры и давления, проходящие через эту границу очень высокие. Эпизодически самоуплотняющаяся зона разрушается и газ или рассол из пластичной породы разгружаются в хрупкую область с гидростатическим давлением. Наиболее вероятным механизмом запуска таких разрушений (или проломов, брешей) самоуплотняющейся зоны может быть восходящая волна магмы, которая временно увеличивает локальную скорость деформации до такой степени, что первоначально пластичный материал претерпевает разрушение от среза/сдвига в ответ на очень небольшую разницу напряжений. Переход от хрупкой к пластичной зоне временно передвигается в более глубокие условия с более высокой температурой. Новые порции внедрения магмы нагревают ранее существующий рассол в пластичном материале, вызывая быстрые расширения этого флюида, которые также приводят к росту скорости деформации.

Рассмотренные выше процессы в магмагеотермальных системах имеют отношение к задачам о распаде разрыва в проницаемой среде. Ранее задача о распаде произвольного разрыва для неизотермической однокомпонентной фильтрации воды и водяного пара была решена в [3]. Исследован случай, в котором с обеих сторон от начального разрыва существуют области двухфазного состояния воды. Было показано, что существует диапазон начальных параметров, при которых формируются внутренние однофазные области фильтрации воды и водяного пара. Решение задачи содержит четыре разрыва – фронта фазового перехода [3, 4]. В работе [4] задача о распаде произвольного разрыва использовалась для тестирования корректности расчета многофазных фильтрационных течений при подземном захоронении углекислого газа в водонасыщенном пласте. Рассматривалось захоронение в неглубоком резервуаре при докритических термодинамических условиях для углекислого газа [4]. В [8] численно решалась задача распада разрыва внутри пористой проницаемой среды, насыщенной воздухом в изотермическом приближении при малых временах (до 6 мс).

2. Постановка задачи

В настоящей работе рассматривается задача распада разрыва в вертикальной проницаемой среде (геотермальной системе) мощностью 10 км. Геотермальная система в начальный момент времени разделена по глубине на две части: нижняя с высокими давлением и температурой, и верхняя с низкими давлением и температурой. Далее эти части системы будут для краткости условно называться, в соответствии с терминологией, принятой в работах по ударным трубам, камерой высокого давления (КВД) и камерой низкого давления (КНД). Условная перегородка, разделяющая камеры, в численном эксперименте разрушается и происходит процесс истечения теплоносителя высоких параметров из КВД в КНД.

Численные эксперименты выполнялись на базе программного комплекса (ПК) AUTOUGH 2.2 Supercritical [5], являющемся расширением ПК TOUGH2 [6,7] на надкритическую область состояния воды. Как показано в [9], ПК TOUGH2 предпочтительнее использовать в численных экспериментах, где исследуется движение пароводяной смеси или пара, по сравнению, например с ПК HYDROTHERM [7], в котором в уравнении энергии пренебрегается работой сжатия. Учитывая, что в данной задаче вода изменяет свое состояние во всем диапазоне фазового состояния от надкритического до жидкости, для выполнения экспериментов был выбран AUTOUGH 2.2 Supercritical. На русском языке краткое описание стандартной, докритической, версии ПК TOUGH2 представлено в [7]. Теплоносителем в экспериментах была принята чистая вода.

В качестве начальных условий для расчета распределения всех параметров по глубине системы до начала распада разрыва, в нижней части системы (КВД) на глубинах от 10 до 4 км задавались давление 80 МПа и температура 530°C, а в верхней части системы (КНД), с глубины 4,001 км до верхней границы (дневной поверхности) — давление 0,1 МПа и паронасыщенность (S_g) 0,99. На глубине 4,0005 км находился центр блока, мощностью 1 м, моделирующий перегородку между камерами. В указанном блоке, для формирования начальных условий до начала «разрушения» перегородки, задавались проницаемость и пористость, равными нулю. Затем выполнялся расчет начальных условий в задаче на установление, до тех пор,

пока параметры системы не переставали меняться. Практически расчет выполнялся на момент времени 360 тыс. лет (рис. 1). После этого перегородка между камерами «разрушалась» путем назначения проницаемости и пористости блока, моделирующего перегородку, равными соответствующим значениям для КВД. В качестве граничных условий на верхней границе (условная дневная поверхность системы) и на нижней границе задавались постоянные значения параметров, равные начальным. Блоки на границах задавались непроницаемыми.

Численный эксперимент проводился для одномерного случая. Для достижения достаточной точности результатов использовалась нерегулярная численная сетка. Вблизи начальной поверхности разрыва (перегородки), с глубины 3 км до глубины 5 км, размер блоков численной сетки задавался равным 1 м (всего 2000 блоков). С дневной поверхности до глубины 3 км, соответственно 100 м (30 блоков), с глубины 5 км до глубины 10 км — 83,3 м (60 блоков). Общее количество блоков численной модели составило 2090.

Численные эксперименты проводились для трех вариантов распределения проницаемости в геотермальной системе, табл. 1. В первом варианте проницаемости верхней (КНД) и нижней (КВД) частей системы приняты равными и составляют 1 мД, что является достаточно высоким значением для проницаемых зон геотермальных систем. Таким образом, первый вариант расчетов соответствует случаю умеренно проницаемых пород системы. Во втором варианте проницаемость нижней части (КВД) задается на порядок ниже, чем в верхней (КНД), где проницаемость остается той же, что в первом варианте. Второй вариант ближе к вероятному ожидаемому случаю, поскольку при температурах выше 400°C проницаемость горных пород незначительна, что соответствует модели Фурнье [1,2], а также подтверждается результатами бурения глубокой геотермальной скважины WD-1 (3729 м) на геотермальном месторождении Какконда (Япония), где встреченные граниты с температурой более 400°C были практически непроницаемы [7]. В третьем варианте проницаемость КНД, по сравнению со вторым, увеличена на порядок, что соответствует случаю высокопроницаемых пород верхней части системы. Пористость пород системы во всех трех вариантах задавалась постоянной, равной 1 %.

Таблица 1

Параметры частей геотермальной системы, принятые в численных экспериментах

| №.№ вариантов | Проницаемость, $10^{-15} \text{ м}^2 \text{ (мД)}$ | |
|---------------|--|-----|
| | КВД | КНД |
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,1 | 1 |
| 3 | 0,1 | 10 |

На рис. 1 представлены начальные фазовые состояния воды, а также начальные распределения безразмерных давления и температуры, определяемых по формулам:

$$P' = \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad T' = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}},$$

где P и T — текущие значения давления и температуры в системе, индексы \min и \max означают минимальные (в КНД) и максимальные (в КВД) значения. Безразмерная координата Z' равна отношению текущей координаты, отсчитываемой от нижней границы вверх, к суммарной мощности системы. В нижней части системы (КВД) $Z' < 0,6$, в верхней части $0,6 < Z' < 1$. Из рис. 1 видно, что в начальный момент времени КВД заполнена водой в надкритическом термодинамическом состоянии, а КНД — перегретым паром. Безразмерная температура в КНД с глубиной практически линейно возрастает от минимального до максимального значения, а в КВД равна максимальному значению и не меняется по глубине. Безразмерное давление в КНД равно нулю и постоянно по глубине, а в КВД линейно возрастает с глубиной от 0,75 до 1.

3. Обсуждение результатов численных экспериментов

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2 — 4 (вариант 1, табл. 1), 5-7 (вариант 2), 8-10 (вариант 3).

Вариант 1. С началом распада разрыва давление в КВД начинает падать, а в КНД — возрастать, рис. 2. Голова волны разряжения движется вглубь КВД с убывающей во времени скоростью, равной на момент времени 1 день с начала процесса — 0,42 м/мин, 5 дней — 0,19 м/мин и 20 дней — 0,11 м/мин. Профиль давления в системе практически перестает

меняться через 50 лет с начала распада разрыва. Температура меняется во времени только в средней части КНД (рис.3), где начинает формироваться двухфазная область течения теплоносителя (рис.4). Отклонение профиля температуры от линейного в КНД растет во времени. В ходе процесса область двухфазной фильтрации в КНД расширяется, а минимальные значения паросодержания снижаются. Примерно через 5 лет с начала процесса в верхней половине КНД формируется зона полностью сконденсированного теплоносителя, или зона конденсата ($S_g=0$, рис. 4), далее во времени расширяющаяся по глубине. Граница раздела надкритической воды и перегретого пара (фронт перегретого пара) движется вглубь нижней части геотермальной системы. Через 5 лет с начала процесса практически вся КВД становится заполненной перегретым паром, только нижние 0,5 км системы заполнены водой в надкритическом состоянии. Полное заполнение КВД перегретым паром наступает через 44,97 лет. Нижняя граница раздела двухфазной зоны и зоны перегретого пара (фронт начала конденсации) движется вглубь системы по направлению к КВД со скоростью, значительно меньшей скорости движения фронта перегретого пара. На больших временах (>5 лет), фазовая структура фильтрационного потока теплоносителя в направлении от дневной поверхности до нижней границы системы складывается следующей: двухфазная зона в верхней части КНД, зона конденсата, узкая переходная двухфазная зона с возрастающей паронасыщенностью, зона перегретого пара и узкая зона теплоносителя в надкритическом состоянии в нижней части КВД. На конечный момент времени численного эксперимента 600 лет почти вся верхняя половина КНД оказывается заполненной конденсатом, ниже следует двухфазная зона фильтрации, а в нижней четверти КНД и во всей КВД движется только перегретый пар.

Вариант 2. Общая динамика процесса та же, что и в варианте 1. Однако, поскольку проницаемость нижней части геотермальной системы (КВД) по сравнению с 1-ым вариантом снижена на порядок, скорости движения головы волны разряжения вглубь КВД так же существенно снижаются и составляют на момент времени: 100 дней с начала процесса — 0,03 м/мин, 1,5 года — 0,007 м/мин (рис. 5). Так же существенно

более медленное происходит и деформация профиля температуры в средней части КНД (рис. 6).

Вариант 3. Сравнивая рис. 5 и 8, 6 и 9, 7 и 10, можно видеть, что увеличение проницаемости пород КНД на порядок по сравнению с вариантом 2 практически не сказывается на динамике изменений параметров системы. Незначительные изменения наблюдаются только в профиле паронасыщенности в КВД на конечное время численных экспериментов 800 лет, рис. 7 и 10.

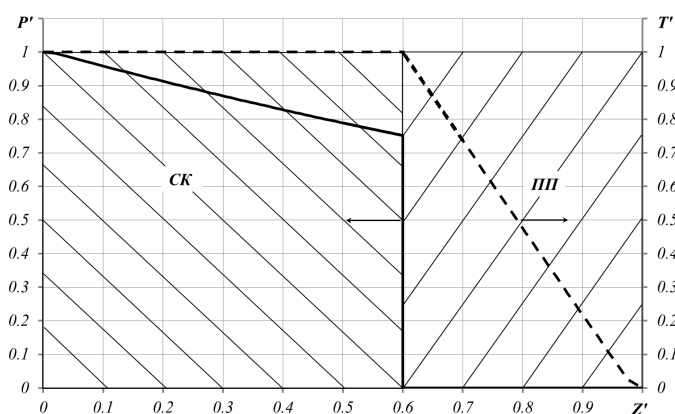


Рис. 1. Начальные распределения фазового состояния, давления и температуры. СК — вода в надкритическом состоянии (штриховка с левым наклоном); ПП — перегретый пар (штриховка с правым наклоном)

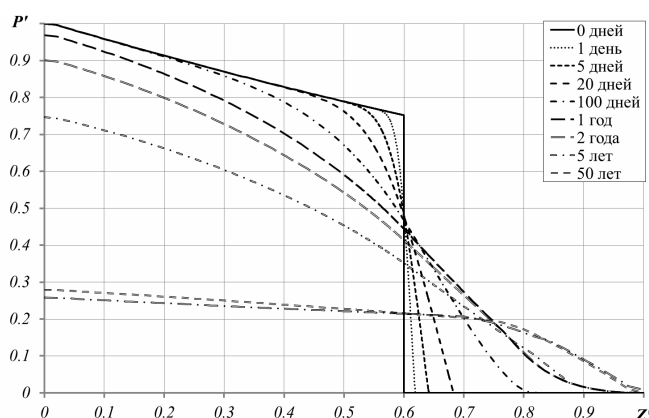


Рис. 2. Изменение во времени распределения давления. Вариант 1

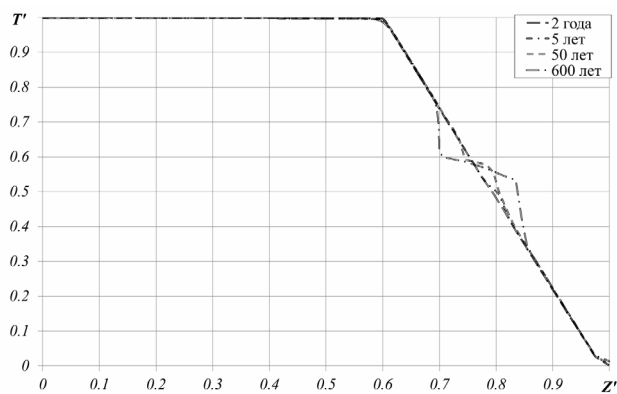


Рис. 3. Изменение во времени распределения температуры. Вариант 1

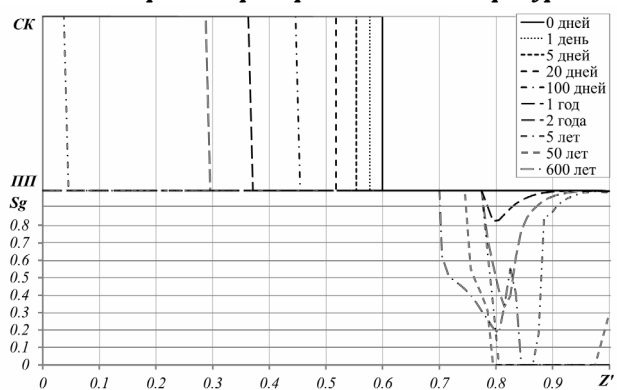


Рис. 4. Изменение во времени распределения фазового состояния. Вариант 1

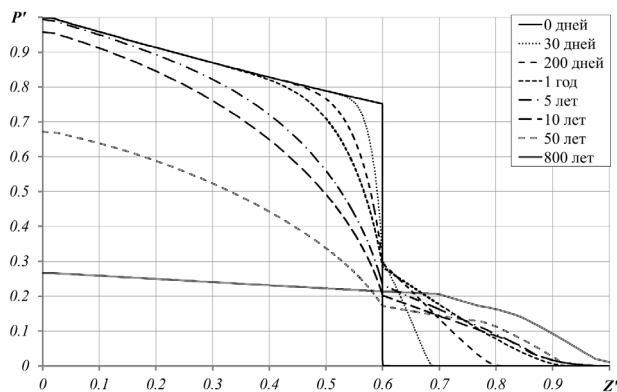


Рис. 5. Изменение во времени распределения давления. Вариант 2

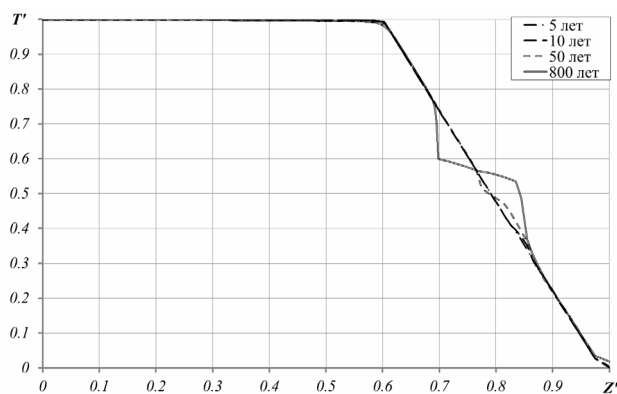


Рис. 6. Изменение во времени распределения температуры. Вариант 2

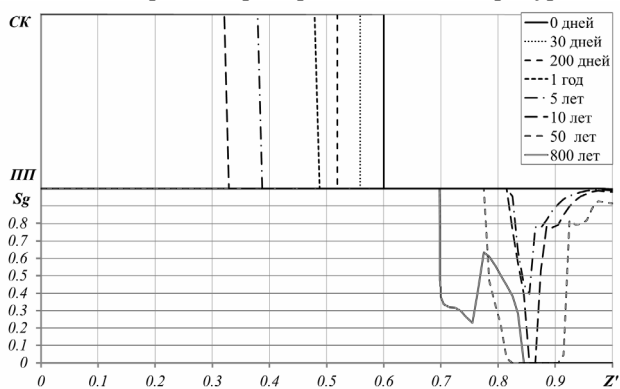


Рис. 7. Изменение во времени распределения фазового состояния. Вариант 2

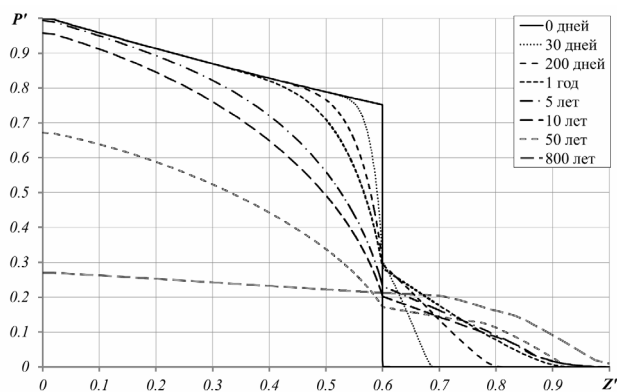


Рис. 8. Изменение во времени распределения давления. Вариант 3

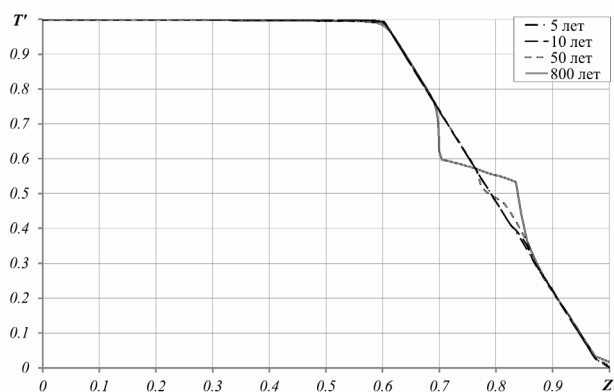


Рис. 9. Изменение во времени распределения температуры. Вариант 3

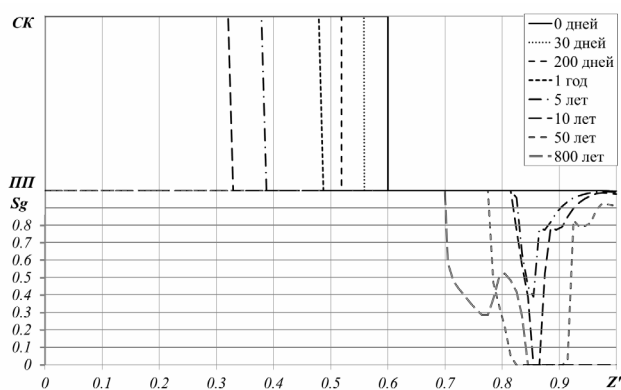


Рис. 10. Изменение во времени распределения фазового состояния. Вариант 3

4. Заключение

В процессе распада разрыва в геотермальной системе с начальными надкритическими параметрами, из нижней ее части происходит истечение теплоносителя в верхнюю часть с начальными докритическими параметрами. Скорость движения волны разряжения вглубь нижней части системы определяется проницаемостью пород этой части системы и практически не зависит от проницаемости пород верхней части. В результате декомпрессии нижней части системы вода из начального надкритического состояния переходит в состояние перегретого пара. В верхней части системы, в ее верхней половине, пере-

гретый пар переходит во влажный с образованием двухфазной области фильтрации, расширяющейся во времени. Позже формируется зона полной конденсации, ограниченная с двух сторон узкими двухфазными областями. На больших временах процесса (800 лет) верхняя часть системы на небольших глубинах оказывается заполненной водой в жидком состоянии, ниже находятся последовательно двухфазная зона и зона перегретого пара, а в нижней части системы, первоначально заполненной надкритической водой, находится перегретый пар.

В будущем представляет интерес рассмотреть случай, когда верхняя часть геотермальной системы представлена трещиновато-пористыми породами и выполнить численные эксперименты с использованием модели двойной пористости. Необходимо также отметить, что представленные выше результаты имеют отношение не только к вопросу о динамике развития маग्магеотермальных систем по модели Фурнье, но также к возможным на практике случаям прохождения надкритических геотермальных зон трещинами гидроразрыва, или скважинами. Начатые здесь численные исследования целесообразно продолжить для формирования представлений о процессах и разработки технологий промышленного освоения надкритических геотермальных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fournier R.O.* Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment, *Economic Geology*, 1999, vol. 94, No. 8, 1193-1211.
2. *Fournier R.O.* The transition from hydrostatic to greater than hydrostatic fluid pressure in presently active continental hydrothermal systems in crystalline rock, 1991, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 18, No. 5, 955-958.
3. *Афанасьев А.А., Бармин А.А.* Нестационарные одномерные фильтрационные течения воды и пара с учётом фазовых переходов// *Изв. РАН. МЖГ*. 2007, №4, С.134-143.
4. *Афанасьев А.А., Мельник О.Э.* Численное моделирование трёхфазной фильтрации при закачке углекислого газа в водонасыщенный пласт // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2013, т. 14, вып. 1, www.chemphys.edu.ru/pdf/2013-09-09-001.pdf.
5. *Croucher A.E., O'Sullivan M.J.*, Application of the computer code TOUGH2 to the simulation of supercritical conditions in geothermal systems, *Geothermics*, 37, 2008, p. 622-634.

6. Pruess K., Oldenburg C., Moridis G. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA, November 1999.

7. Пашкевич Р.И., Таскин В.В. Термогидродинамическое моделирование теплопереноса в породах Мутновской магмагеотермальной системы. Владивосток: Дальнаука, 2009. 209 с.

8. Пашкевич Р.И. Численное моделирование фильтрации при быстрой декомпрессии неподвижной газонасыщенной пористой среды // Газовая промышленность, 2009, №7. – С. 40-42.

9. Пашкевич Р.И. Об уравнении сохранения энергии при фильтрации перегретого пара в геотермальном коллекторе // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2», 2015, с. 378-387. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Пашкевич Роман Игнатьевич – доктор технических наук, директор, pashkevich@kscnet.ru,

Шадрин Александр Витальевич – младший научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



UDC 536.246+550.367+519.876.5+621.311.25

BREAKDOWN OF DISCONTINUITY IN GEOTHERMAL SYSTEMS UNDER SUPERCRITICAL THERMODYNAMICAL CONDITIONS

Pashkevich R.I., Doctor of Technical Sciences, Director, pashkevich@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,

Shadrin A.V., Junior Researcher, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

The results of numerical solution of the problem of breakdown of a discontinuity in a geothermal system under initial supercritical thermodynamic conditions on the basis of software AUTOUGH 2.2 Supercritical are presented.

Key words: breakdown of a discontinuity, numerical simulation, supercritical thermodynamic conditions, geothermal system.

REFERENCES

3. Afanas'ev A.A., Barmin A.A. *Nestatsionarnye odnomernye fil'tratsionnye techeniya vody i para s uchotom fazovykh perekhodov* (one-dimensional non-stationary filtration flow of water and steam with phase transitions) // Izv. RAN. MZHG. 2007, No 4, pp.134-143.
4. Afanas'ev A.A., Mel'nik O.EH. *Chislennoe modelirovanie tryokhfaznoj fil'tratsii pri zakachke uglekislogo gaza v vodonasyshennyj plast* (Numerical simulation of three-phase filtration for injection of carbon dioxide in water-saturated layer) //Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoj dinamike, 2013, t. 14, vyp. 1, www.chemphys.edu.ru/pdf/2013-09-09-001.pdf.
7. Pashkevich R.I., Taskin V.V. *Termogidrodinamicheskoe modelirovanie teploperenosu v porodakh Mutnovskoj magmageotermal'noj sistemy* (Thermo-hydrodynamics simulation of heat transfer in rocks of the Mutnovsky imageoverlay system). Vladivostok: Dal'nauka, 2009. 209 p.
8. Pashkevich R.I. *Chislennoe modelirovanie filtracii pri bystroj dekompressii nepodvizhnoj gazonasyshchennoj poristoj sredy* (Numerical modeling of filtration in a rapid decompression stationary gas-saturated porous medium) //Gazovaya promyshlennost', 2009, No 7, pp.40–42.
9. Pashkevich R.I. *Ob uravnenii sokhraneniya energii pri fil'tratsii peregreтого para v geotermal'nom kollektore* (On the equation of conservation of energy filtering in geothermal superheated steam manifold) // GIAB No 11. Spetsialnyy vypusk No 63 «Kamchatka-2». 2015, pp. 378-387.