

Моделирование опытно-фильтрационных испытаний поисковой скважины 1П в юго-западном секторе предгорий Корякского вулкана

Воронин П.О.¹, Хмарин Э.К.², Кирюхин А.В.¹, Панарина Е.П.²

Modeling of the flow tests of the 1P exploration well in the southwestern sector of the Koryaksky volcano foothills

Voronin P.O., Khmarin E.K., Kiryukhin A.V., Panarina E.P.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: malgor90@mail.ru, AVKiryukhin2@mail.ru

² *ООО «ЗН Геотерм» (ГК АО «Зарубежнефть»), г. Москва;*

e-mail: EKhmarin@nestro.ru

Выполнено прямое и инверсионное iTOUGH2-EWASG моделирование опытной откачки из поисковой скважины 1П (сентябрь 2025 г.) для оценки фильтрационно-емкостных свойств целевого резервуара.

Введение

Кеткинское геотермальное месторождение находится на западной окраине Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна (рис. 1). Естественные разгрузки представлены слаботермальными (11 °С) Пиначевскими источниками на территории в междуречьях рек Пиначевская-Колокольникова, в непосредственной близости к северо-востоку от поселка Кеткино [2].

В процессе поисково-разведочных работ был проведен комплекс исследований (геофизические, буровые и тематические работы), подтвердивших перспективность площади на выявление месторождения термальных вод. Особое значение для организации поисковых работ приобрели геофизические работы, проведенные в 1982 г., и электроразведочные работы методом ЗСБЗ, проведенные в 1984 г. [2]. Одна из выделенных геофизических аномалий высокой проводимости в 1986 г. была заверена бурением. Скважина 23 глубиной 341 м вывела на поверхность термальные воды (дебит самоизлива 9.3 л/с, температура воды на устье 57 °С, избыточное давление – 0.73 атм.). Месторождение приурочено к поднятию кровли юрско-мелового фундамента [1, 3].

Скважины Кеткинской площади, в отличие от других скважин Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, выводят на поверхность термальные воды с температурой до 60 °С при схожем газогидрохимическом составе [4, 9, 10].

В настоящее время повышенный интерес представляет территория к востоку от ранее разбуренного участка. С 2023 по 2024 гг. был выполнен комплекс геофизических работ на территории Корякско-Кеткинского лицензионного участка (рис. 1). Одним из результатов этих работ стало строительство в начале 2025 г. поисковой скважины 1П.

Забой поисковой скважины 1П достиг отметки 2652 м, при этом измеренная температура составила 80.4 °С, что эквивалентно геотермальному градиенту 3.3 °С/100 м. По данным ГИС, основной интервал притока флюида в скважине на контакте между вулканогенно-осадочной частью и фундаментом – 2109-2140 м. Статический уровень воды в скважине 290 м [5].

В августе-сентябре 2025 г. была выполнена опытная откачка скважины 1П, по результатам которой и было проведено нижеописанное моделирование.

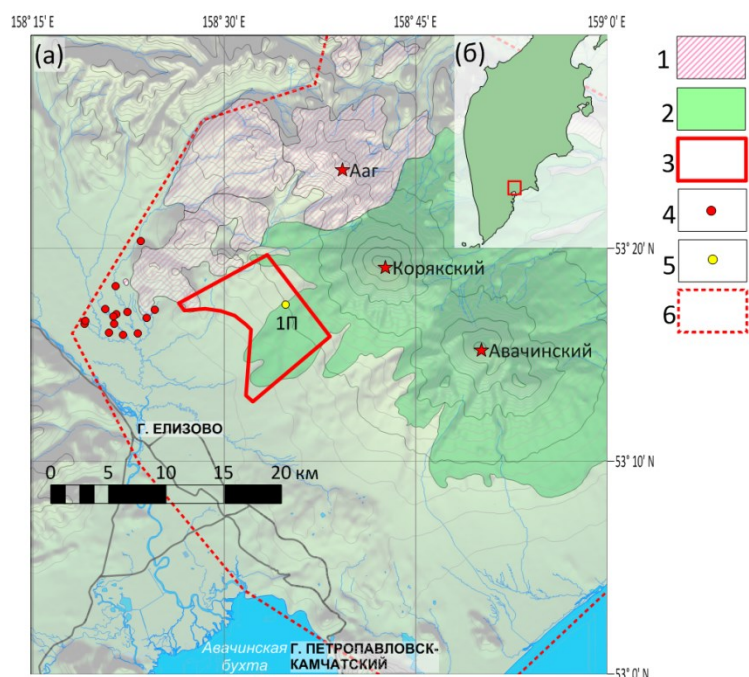


Рис. 1. а) – обзорная карта западной части Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна. 1 – Q2-3 – суббассейн Пиначевских экструзий; 2 – Q3-4 – Авачинский, Корякский, Козельский вулканы и продукты вулканических извержений; 3 – граница Корякско-Кеткинского лицензионного участка; 4 – скважины Кеткинского геотермального месторождения; 5 – поисковая скважина 1П; 6 – условные границы Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна. б) – положение района исследования на карте Камчатки.

TOUGH2-EWASG моделирование опытной откачки скважины 1П

1. Сборка модели

Для сборки модели и моделирования использованы PetraSim v. 5.2 и iTOUGH2-EOS14 (EWASG) [6-8, 11].

Вычислительная сетка. Для моделирования была использована радиальная вычислительная сетка с радиусом 200 м, состоящая из 50 элементов, размер которых увеличивается от центра с X-фактором 1.11237, при этом радиус скважины 0.11 м, кровля целевого резервуара мощностью 30 м определена на глубине 1900 м.

Начальные и граничные условия. В качестве первого приближения на модели задано давление 150 бар, температура 67 °С, массовая доля хлорида натрия 0.01, массовая доля метана 0.0005. На внешней границе модели задано постоянное давление. На скважине задается расход, зависящий от времени, по данным замеров на устье в процессе испытаний в августе-сентябре 2025 г. Измерение расхода скважины происходило на ее устье, всего было использовано 77 значений измерений, оцифрованных с графика из работы [5].

Материальные свойства. В качестве первого приближения на модели пористость была задана 0.02, минеральная плотность породы 2650 кг/м³, проницаемость 11.4 мД, сжимаемость 1e-8 Па⁻¹.

Данные для калибровки модели. Для калибровки модели использованы данные измерений давления в скважине на глубине 1840 м, всего было использовано 125 значений, оцифрованных с графика из работы [5].

2. Оценка фильтрационно-емкостных свойств резервуара по данным прямого TOUGH2-EWASG моделирования

Было просчитано 6 вариантов модели с различными комбинациями материальных свойств. Расхождение модельного давления в стволе скважины с реально измеренными показателями составило 25-30 бар. В связи с этим выполнена автоматическая калибровка модели по опытным данным (см. пункт 3).

3. Оценка фильтрационно-емкостных свойств резервуара по данным инверсионного iTOUGH2-EWASG моделирования

В качестве наблюдаемых данных для калибровки модели использованы данные об изменении забойного давления в скважине во время опытной откачки (см. пункт 1). В качестве оцениваемых параметров модели рассматривались: (1) проницаемость, (2) пористость, (3) поровая сжимаемость, (4) начальное давление на глубине измерений 1840 м, (5) проницаемость внутри зоны скин-эффект заданного радиуса.

Выполнены два варианта инверсионного моделирования с различными наборами калибровочных данных (1 – все калибровочные данные о давлении, 2 – калибровочные данные о давлении только за период времени с 7 по 8 сентября 2025 г). Значения оцениваемых параметров для каждого из выполненных вариантов представлены в таблице. Отклонения результатов моделирования для каждого из вариантов от фактических данных показаны на рис. 2.

Таблица. Результаты оценивания параметров модели.

Оцениваемый параметр	Вариант 1	Вариант 2	Ед. изм.
Проницаемость	1.22096e-14	2.13130e-14	м ²
Пористость	0.015	0.01	
Поровая сжимаемость	8.13906e-07	2.54682e-08	Па ⁻¹
Начальное давление (глубина 1840 м)	149.6	130.2	бар
Проницаемость зоны скин-эффекта радиусом 0.69 м	9.90099e-06	7.52108e-06	м ²

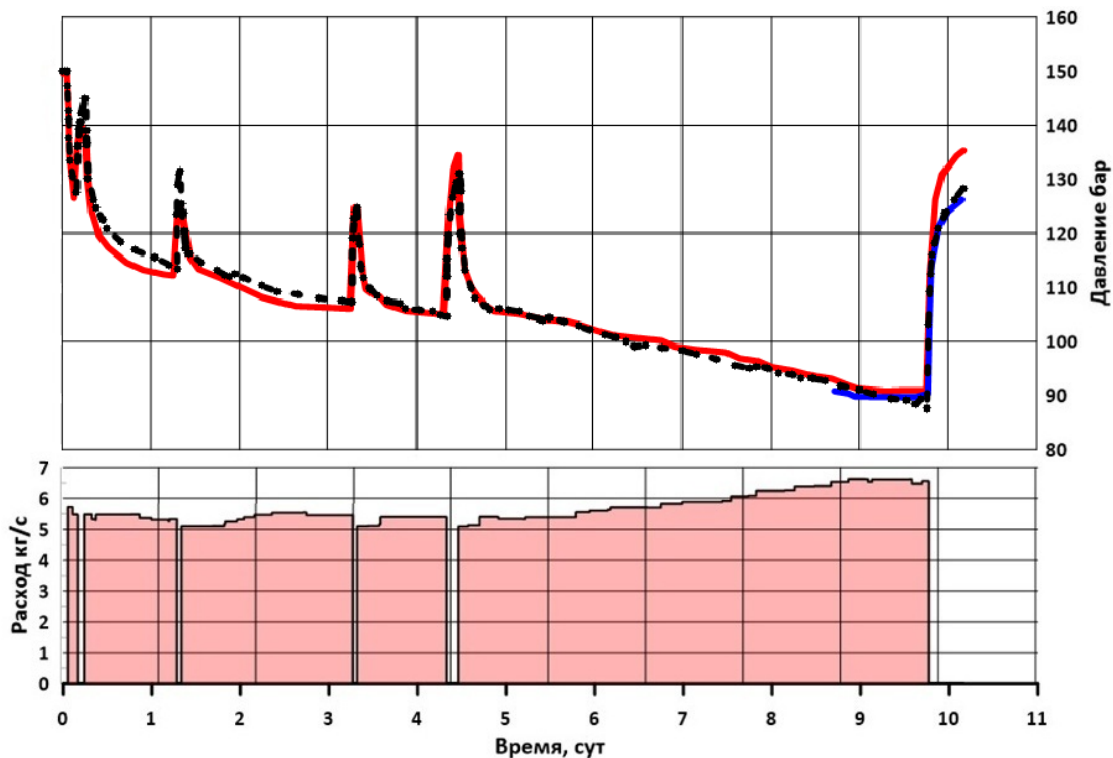


Рис. 2. Сопоставление iTOUGH2-EWASG моделирования изменения давления с фактическими данными испытания скважины для двух наборов калибровочных данных. Черными точками обозначены реально измеренные значения забойного давления, красной линией – модельное давление при варианте 1, синей – при варианте 2.

Как видно из графика (рис. 2), первый вариант инверсионного моделирования (со всеми калибровочными данными о давлении) хорошо воспроизводит опытные данные за исключением восстановления давления после окончания откачки.

Второй вариант (с выборочным интервалом калибровочных данных) хорошо воспроизводит опытные данные восстановления давления после окончания откачки.

Выводы

В результате iTOUGH2-EWASG моделирования выполнена оценка фильтрационно-емкостных свойств целевого геотермального резервуара в юго-восточном секторе Корякского вулкана. Улучшение калибровки модели может быть достигнуто за счет уточнения графика расхода откачки при проведении опытных работ (сентябрь 2025 г.) и учета инерционности скважины, а также оценки влияния внешнего радиуса целевого резервуара и внешних граничных условий, что является задачей дальнейших исследований.

Представленная работа ведется в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН № FWME-2024-0007 и соглашения о сотрудничестве между ИВиС ДВО РАН и ООО «ЗН НТЦ» № 3-14-29/25.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Гидрогеология вулканогенов / А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин. СПб.: Наука, 2010. 395 с.
2. *Нурмухамедов А.Г., Нетесов Ю.А.* Отчет о геофизических работах, выполненных 2-й Кеткинской партией в 1982-1984 гг. Пиначевская площадь. 1984 г. 102 с.
3. *Поздеев А.И.* Углеводородная газогенерация Авачинской депрессии, ее перспективы и связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 44-54.
4. *Таран Ю.А., Рябинин Г.В., Покровский Б.Г. и др.* Минеральные воды Авачинской депрессии, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. Вып. 50. № 2. С. 22-39.
5. *Хмарин Э.К.* Текущий статус ГРП на геотермальных участках Компании АО «Зарубежнефть». Комплексирование методов, результаты поискового бурения // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 2025. С. 88-92.
6. *Battistelli A., Calore C., Pruess K.* The simulator TOUGH2/EWASG for modeling geothermal reservoirs with brines and non-condensable gas // Geothermics. 1997. V. 26(4). P. 437-464.
7. *Finsterle S.* iTOUGH2 User's Guide. Report LBNL-40040. Berkeley, CA, USA, 1999. 130 p.
8. *Kiryukhin A.V., Asaulova N.P., Finsterle S.* Inverse modeling and forecasting for the exploitation of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia // Geothermics. 2008. V. 37. P. 540-562.
9. *Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P.* Geofluid systems of Koryaksky-Avachinsky volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017. V. 2017. Art. 4279652. <https://doi.org/10.1155/2017/4279652>
10. *Kiryukhin A.V., Nazhalova I.N., Zhuravlev N.B.* Hot water-methane reservoirs at northwest foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka // Geothermics. 2022. V. 106. Art. 102552.
11. *Pruess K., Oldenburg C., Moridis G.* TOUGH2 User's guide, Version 2.0. Rep. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA, USA, 1999. 198 p.