

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Павлова Кирилла Алексеевича на тему **«Исследование процессов теплопереноса в породах Авачинской площади в естественном состоянии и при перспективном получении геотермальной энергии»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Тема диссертационной работы, посвященная количественной оценке термогидродинамических условий в породах Авачинской геотермальной площади и установления рациональных параметров освоения ее тепловых ресурсов по технологии геотермальных циркуляционных систем, является весьма актуальной для развития геотермальной отрасли в Камчатском крае, обладающем огромными запасами глубинной тепловой энергии.

Результаты работы, полученные в ходе исследований автором, могут быть рекомендованы при дальнейших исследованиях геотермальных ресурсов объекта. Полученные прогнозные параметры Авачинской геотермальной площади позволяют оценить потенциал объекта для перспективного освоения по технологии геотермальных циркуляционных систем, успешно применяемой во многих странах мира. Установленные рациональные технологические параметры системы разработки высокотемпературной области горных пород могут быть рекомендованы при строительстве опытной ГеоЭС в перспективе освоения энергетического потенциала объекта.

Содержание работы в достаточной мере отражено в печатных работах (11 статей, в том числе 9 в научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ). Достоверность результатов работы обеспечивается надежностью исходных данных об объекте моделирования, использованием фундаментальных законов сохранения массы и энергии в основе численной модели.

Замечания к работе относятся, в основном, к практическому абстрагированию от химического и химико-термодинамического аспектов исследования: как в концептуальной модели Авачинской гидротермальной системы, так и в модели циркуляционного дублета скважин.

1. В системе уравнений сохранения массы и энергии (1) и (2) – основе защищаемых моделей – учитывается только первичная (поровая) проницаемость и игнорируется вторичная, между тем как на самом деле потоки гидротерм находятся в главных структурах именно вторичного происхождения. Эти структуры формируются в результате вторичных процессов, которые мощнее и продолжительнее структур, образованных первичными процессами. Способность структуры к проводимости гидротерм изменяется, примерно, в четвертой степени по отношению к ширине структуры (в зависимости от формы) [Bonham, 1989; Wake et al., 1996]. Таким образом, для проводимости гидротерм несколько больших разломов важнее, чем множество

мелких пор и трещин. К тому же со временем отложение гидротермальных минералов блокирует первичные каналы проницаемости гораздо основательнее, чем вторичные, которые могут обновляться, тогда как первичные каналы не испытывают такой регенерации. Учесть это в модели проще всего было бы переходом от пористости к проницаемости и введением частных производных проницаемости по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

2. В работе не учитывается весьма существенное влияние отложения вещества из гидротермальных растворов на проницаемость их коллекторов, тогда как «залечивание» вторичных и особенно первичных трещин может происходить исключительно быстро. Так, например, В.Я. Медведевым с коллегами в ИЗК СО РАН была экспериментально обоснована зависимость скорости «залечивания» трещин в силикатных породах от размеров и формы нарушений сплошности породных массивов, P-T-условий, состава пород и насыщенности флюида:

$$v = \Lambda \frac{e^{-\frac{Q}{kT}}}{T} = \beta \omega (Y - Y_0) \left( \frac{\partial c}{\partial T} \right) \Delta T,$$

где  $v$  – скорость перемещения замыкания трещины (фактически скорость «залечивания»);  $\Lambda$  и  $\omega$  – константы, зависящие от начальной геометрии трещины;  $Q$  – энергия активации, например, для кварца по оценкам [Smith, Evans, 1984] равна 50 кДж/моль;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $\beta$  – коэффициент, определяемый экспериментально по углу наклона на графике «скорость – ширина трещины» и прямо зависящий от плотности дислокаций в среде;  $(Y - Y_0)$  – разность между размером сужающейся поры и его критическим значением;  $c$  – концентрация раствора [Медведев, Иванова и др., 2014]. По их оценкам, а также оценкам на основе других исследований [Ружич и др., 1990, 2014; Котельникова, 2000; Kocharyan, 2009], длительность полного «залечивания» пор в условиях, аналогичных рассматриваемым в диссертации, составляет 200–1000 часов. Следовательно, проницаемость коллекторов гидротермальных систем должна постоянно поддерживаться микро- и/или макротектоническими событиями. Заметим еще, что время «залечивания» тектонических трещин в Байкальской рифтовой зоне, разломах Сан-Андреас и Хэйворд, согласно рекуррентности мультиплетных сейсмических событий, также не должно превышать нескольких недель. Таким образом, в работе хотя и отмечена связь между сейсмическими событиями и эволюцией гидротермальной системы, но характер этой связи не раскрыт и математически не описан, что и не позволило использовать ее в предлагаемых моделях.

3. Из автореферата не совсем ясно понимание сосискателем сущности надкритического состояния флюида. Если в модели дублета скважин при движении от нагнетательной до добычной скважины есть переходы от надкритического состояния до перегретого и обратно, то модель должна быть усложнена учетом больших плотностных неоднородностей во флюиде, а значит, больших скачков растворимости. Это также неизбежно повлечет за собой изменение проницаемости коллектора из-за растворения и осаждения вещества на пути движения флюида.

