

УДК 550.341.5

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАУЖЕТСКОГО И МУТНОВСКОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (КАМЧАТКА, РОССИЯ)

© 2014 г. А. В. Кирюхин¹, Н. П. Асаулова², О. Б. Верейна³, А. Ю. Поляков¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, e-mail: avk2@kscnet.ru

²ГУП “Камчатскбургеотермия”

684035 пос. Термальный, Крашенинникова, 1

³Геологический институт РАН

119017 Москва, Пыжевский пер., 7

Поступила в редакцию 16.04.2012 г.

Показано, что при эксплуатации Паужетского геотермального месторождения (1960–2007 гг.) в продуктивный резервуар поступает значительное количество метеорных вод, оцениваемое в 30% от расхода отбора теплоносителя, что приводит к охлаждению продуктивного резервуара и снижению добычи пара. Моделирование процесса эксплуатации при условии изоляции зон инфильтрации показывает возможность увеличения продукции пара на 23.2%. Многовариантное моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения показывает, что наиболее вероятным сценарием эксплуатации является инфильтрация метеорных вод с расходом около 60 кг/с в продуктивный резервуар сверху. Эти результаты согласуются с понижением паросодержания в первые четыре года эксплуатации.

DOI: 10.7868/S0203030614020035

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование эксплуатации Паужетского геотермального месторождения [Кирюхин и др., 2010a] показало, что при введении в модель пяти дополнительных скважин в период с 2007 по 2032 гг. сохраняется средняя паропроизводительность в 29 кг/с, достаточная для поддержания мощности 6.8 МВт эл. на Паужетской геотермальной электростанции (ГеоЭС). Приток метеорных вод составил 30% от общего объема извлекаемого флюида. Инфильтрация метеорных вод в геотермальный резервуар может происходить через плохо зацементированные ликвидированные скважины, что должно приводить к охлаждению продуктивных зон и отрицательно влиять на параметры продуктивности. Многовариантное моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского месторождения позволило уточнить условия обеспечения паром Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт эл. в течение 15 лет, с использованием семи дополнительных модельных скважин на этом участке [Кирюхин, 2005]. Аномально низкие уровни воды (на глубинах 500–600 м) также приводят к вертикальной инфильтрации метеорных вод в продуктивные зоны через плохо зацементированные ликвидированные скважины. Сводный анализ промысловых данных за 2000–2006 гг. совместно с численным моделированием показал возможность таких явлений.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАУЖЕТСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В основе трехмерной численной модели эксплуатации Паужетского геотермального месторождения лежит концептуальная гидрогеологическая модель Паужетской гидротермальной системы [Kiryukhin et al., 2008]. Для создания численной модели были использованы пакеты программ TOUGH2, iTOUGH2, генератор сеток A-MESH [Finsterle, 2007; Haukwa, 1998; Pruess et al., 1999], для калибровки модели-результаты моделирования естественного состояния системы совместно с данными по эксплуатации месторождения за период с 1960 по 2006 гг. [Kiryukhin et al., 2008]. В откалиброванной модели из условий теплового и массового баланса были определены источники геотермальных ресурсов месторождения. Было проведено прогнозное моделирование эксплуатации месторождения для периода с 2007 по 2032 гг., при условии введения в модель пяти дополнительных скважин и усовершенствования паропровода от скважин 122 и 131 (понижения устьевого давления на скважинах). Результаты моделирования показали, что суммарный расход пароводяной смеси сохраняется в диапазоне 266.1–317.7 кг/с (288.3 кг/с в среднем), а суммарная паропроизводительность – в диапазоне 26.8–

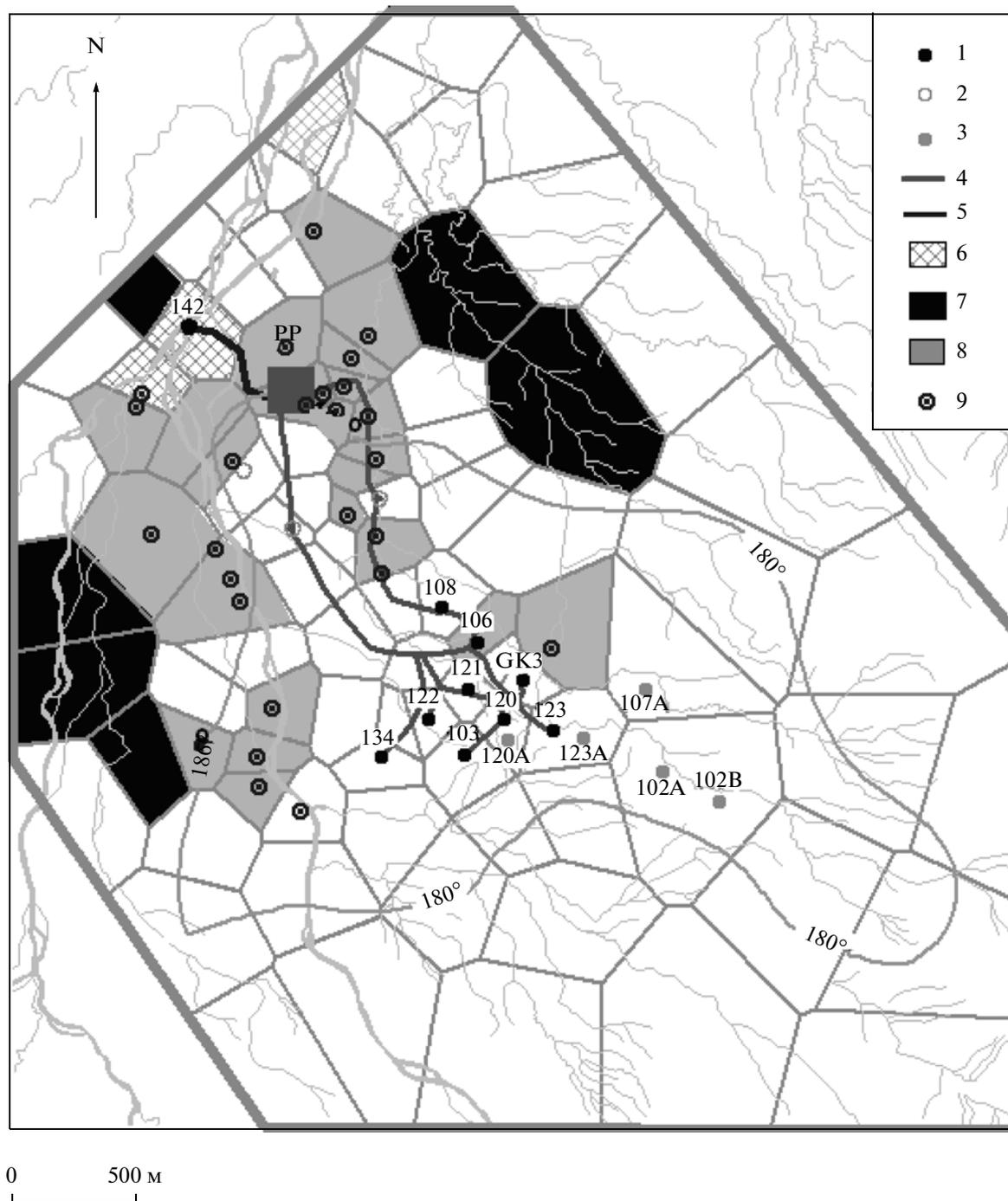


Рис. 1. Численная сетка для моделирования эксплуатации Паужетского геотермального месторождения, по [Kiryukhin et al., 2010]. Изотерма 180°C соответствует начальной температуре на абсолютной отметке –250 м. Скважина 142 – нагнетательная; PP – геотермальная электростанция.

1 – существующие эксплуатационные скважины, 2 – старые эксплуатационные скважины, 3 – дополнительные скважины, 4 – паропроводы, 5 – отдельный водопровод, 6 – участки горячих источников, 7 – области низкой проницаемости, 8 – области инфильтрации, 9 – потенциальные проводники инфильтрации (ликвидированные или наблюдаемые скважины на участках инфильтрации).

31.9 кг/с (28.9 кг/с в среднем), что достаточно для поддержания мощности 6.8 МВт эл. на Паужетской ГеоЭС. Минимальная суммарная производи-

тельность существующих скважин (103, 106, 108, 120, 121, 122, 123, 131 и GK3) составит 159.2 кг/с (в том числе 12.8 кг/с пара) (рис. 1).

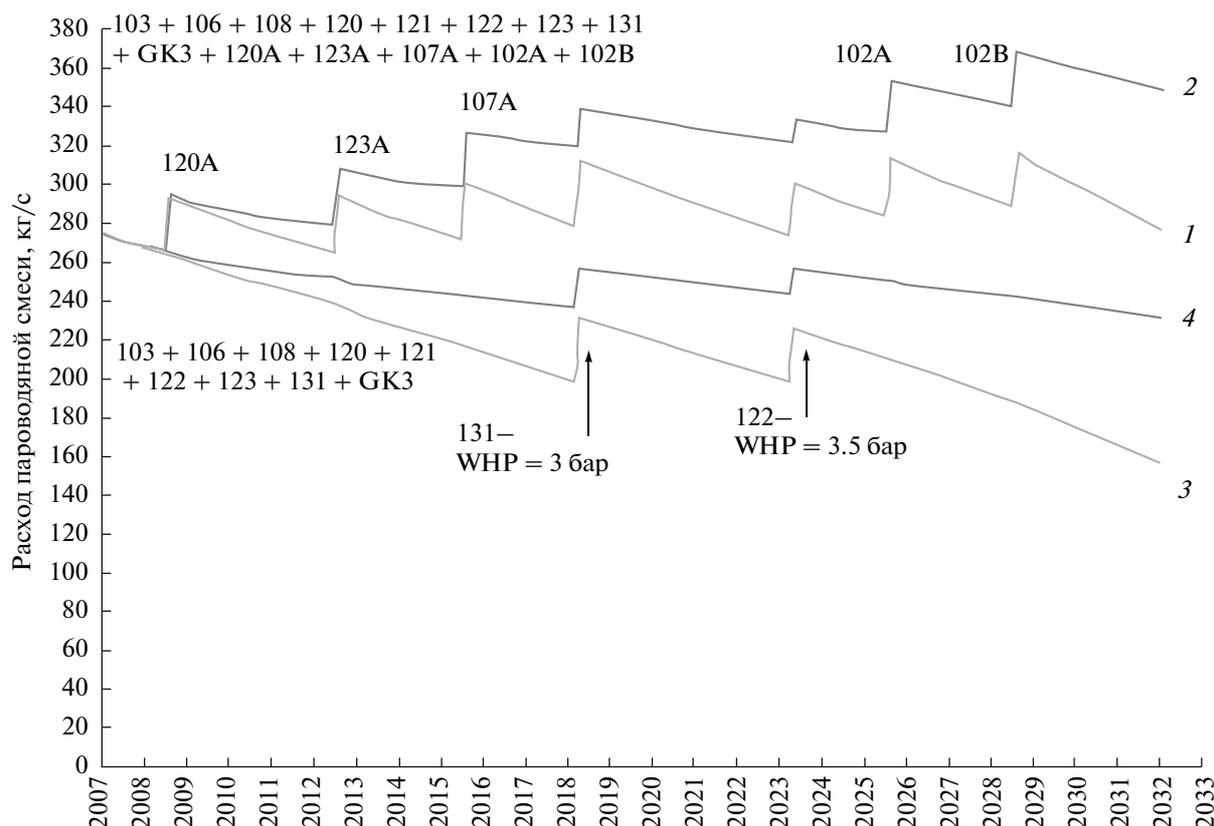


Рис. 2. Паужетское геотермальное месторождение: результаты прогнозного моделирования.

1 – суммарный двухфазный расход для скв. 103, 106, 108, 120, 121, 122, 123, 131, GK3, 120A, 123A, 107A, 102A и 102B в течение 2007–2032 гг. [Kiryukhin et al., 2008, 2010]; 2 – то же при условии отключения областей инфильтрации; 3 – суммарный двухфазный расход с учетом только скважин, существующих на декабрь 2006 г. [Kiryukhin et al., 2010]; 4 – то же при условии отключения областей инфильтрации.

Согласно результатам моделирования, а также данным об изотопном составе H_2O (T, D, O^{18}) и анализу баланса хлора, приток метеорных вод на Паужетском месторождении составляет 30% от общего объема извлеченного флюида [Кирюхин и др., 2010а]. Это установлено не только в бывшей области разгрузки существовавших ранее горячих источников, но и главным образом в районе ликвидированных скважин, где до начала эксплуатации никакой естественной разгрузки не наблюдалось (см. рис. 1). Изотопный состав воды (D) добычных скважин по состоянию на 2005 г. соответствовал составу воды р. Паужетка [Кирюхин и др., 2010б]. Отсюда можно сделать вывод, что некоторые (плохо зацементированные) из ликвидированных скважин могут служить путями инфильтрации метеорных вод в резервуар, что должно вызывать охлаждение продуктивных зон и отрицательно влиять на параметры продуктивности.

Следующий вариант моделирования показал, что производительность можно значительно повысить, если прекратить инфильтрацию через ликвидированные скважины. После исключения областей инфильтрации в модели (см. рис. 1) для

периода с 2007 по 2032 гг. были получены следующие прогнозные результаты (рис. 2, 3): суммарный расход пароводяной смеси – 267.0–370.0 кг/с (322.4 кг/с в среднем), суммарная паропроизводительность – 28.9–41.2 кг/с (35.6 кг/с в среднем), а минимальная производительность существующих скважин (103, 106, 108, 120, 121, 122, 123, 131 и GK3) – 274.7 кг/с (в том числе 24 кг/с пара). Таким образом, согласно результатам моделирования, суммарную паропроизводительность можно увеличить в среднем на 23.2%. Кроме того, минимальная паропроизводительность существующих скважин может вырасти на 87.5%. Это позволит повысить мощность электростанции с 7 до 8.6 МВт эл. без бурения дополнительных скважин.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На Мутновском месторождении – крупнейшем на Камчатке высокотемпературном геотермальном месторождении, расположенным вблизи г. Петропавловска-Камчатского, сейчас работают две гео-

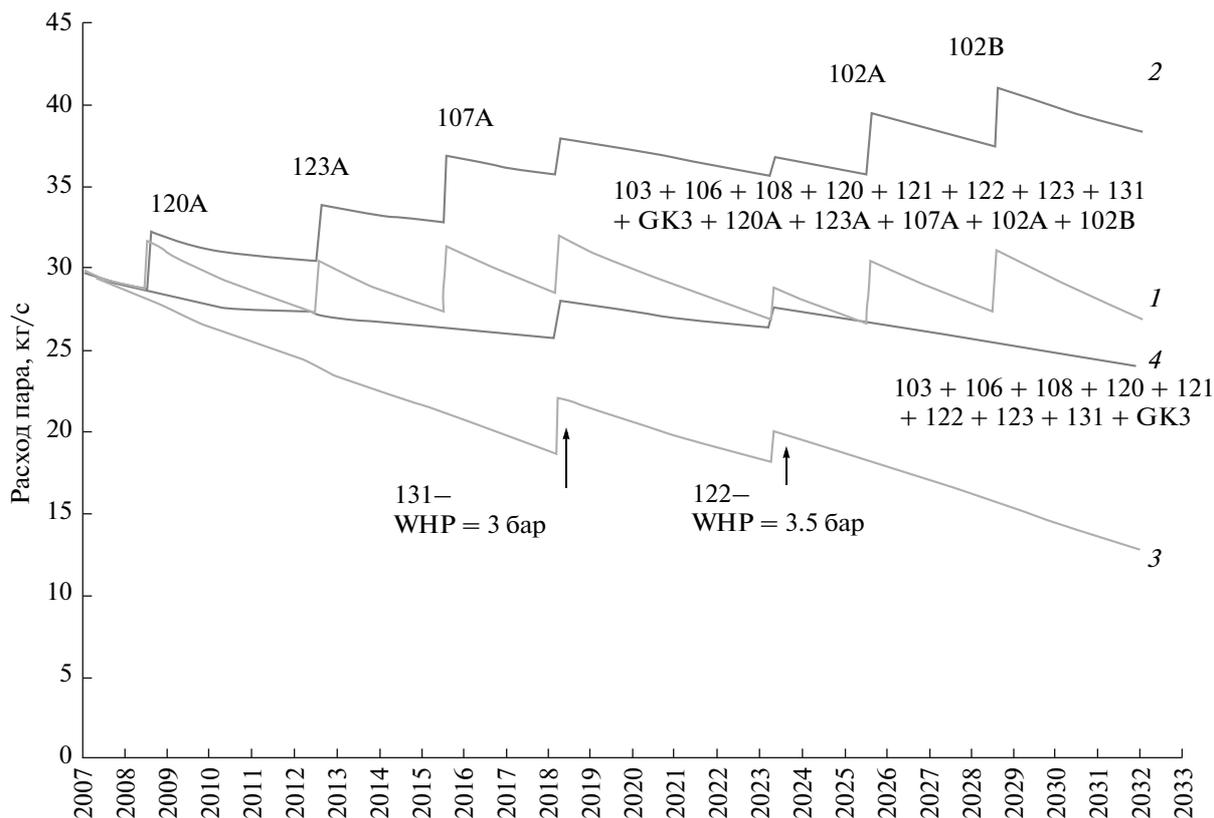


Рис. 3. Паужетское геотермальное месторождение: результаты прогнозного моделирования.

1 – суммарная паропроизводительность для скв. 103, 106, 108, 120, 121, 122, 123, GK3, 120A, 123A, 107A, 102A и 102B в течение 2007–2032 г. [Kiryukhin et al., 2008; 2010]; 2 – то же при условии отключения областей инфильтрации; 3 – паропроизводительность с учетом только скважин, существующих на декабрь 2006 г. [Kiryukhin et al., 2008; 2010]; 4 – то же при условии отключения областей инфильтрации. Паропроизводительность была рассчитана при давлениях сепарации на соответствующих скважинах.

термальные электростанции: Верхне-Мутновская (с 1999 г. – 12 МВт эл.) на участке Верхне-Мутновский и Мутновская (с 2002 г. – 50 МВт эл.) на участке Дачный. Возможные варианты эксплуатации участка Дачный Мутновского месторождения были впервые проанализированы в работах [Kiryukhin, 1996; Кирюхин и др., 2005; Kiryukhin, 2005; Kiryukhin, Vereina, 2005]. В его центральной части находится продуктивная зона “Основная”, вскрытая многочисленными скважинами и изученная в период с 2001 по 2003 г. После уточнения геометрии этой зоны была разработана концептуальная гидрогеологическая модель резервуара [Кирюхин и др., 2005], в которой описана вскрытая скважинами продуктивная зона, приуроченная к разломной зоне северо-северо-восточного простирания падением 60° на восток-юго-восток и средней вертикальной мощностью около 240 м (истинная мощность 120 м). Эта модель была усовершенствована путем учета теплообмена продуктивной зоны с вмещающим ее массивом горных пород [Kiryukhin, Vereina, 2005]; с помощью численного моделирования (на основе паке-

та программ TOUGH2 [Pruess et al., 1999]) был проведен анализ естественного состояния продуктивной зоны и дан прогноз различных режимов эксплуатации участка Дачный.

Генерация вычислительной сетки

Гидротермальный резервуар был представлен в виде единого резервуара, объединяющего продуктивную зону “Основная” [Кирюхин и др., 2005] и вмещающие горные породы [Kiryukhin, Vereina, 2005]; оба резервуара совпадают в плане с основной вычислительной сеткой, привязанной к существующим скважинам (рис. 4). При создании вычислительной сетки использован генератор сеток A-MESH [Науква, 1998]; при этом проводилось дополнительное преобразование параметров для учета деформаций элементов модели при их взаимодействии в вертикальной плоскости [Кирюхин и др., 2005]. Для создания вычислительной сетки, соответствующей массиву вмещающих горных пород, была использована 5-ти-слойная система (слои заданы на абс. отм. +750, +250, –250, –750, –1250 м), элементы которой

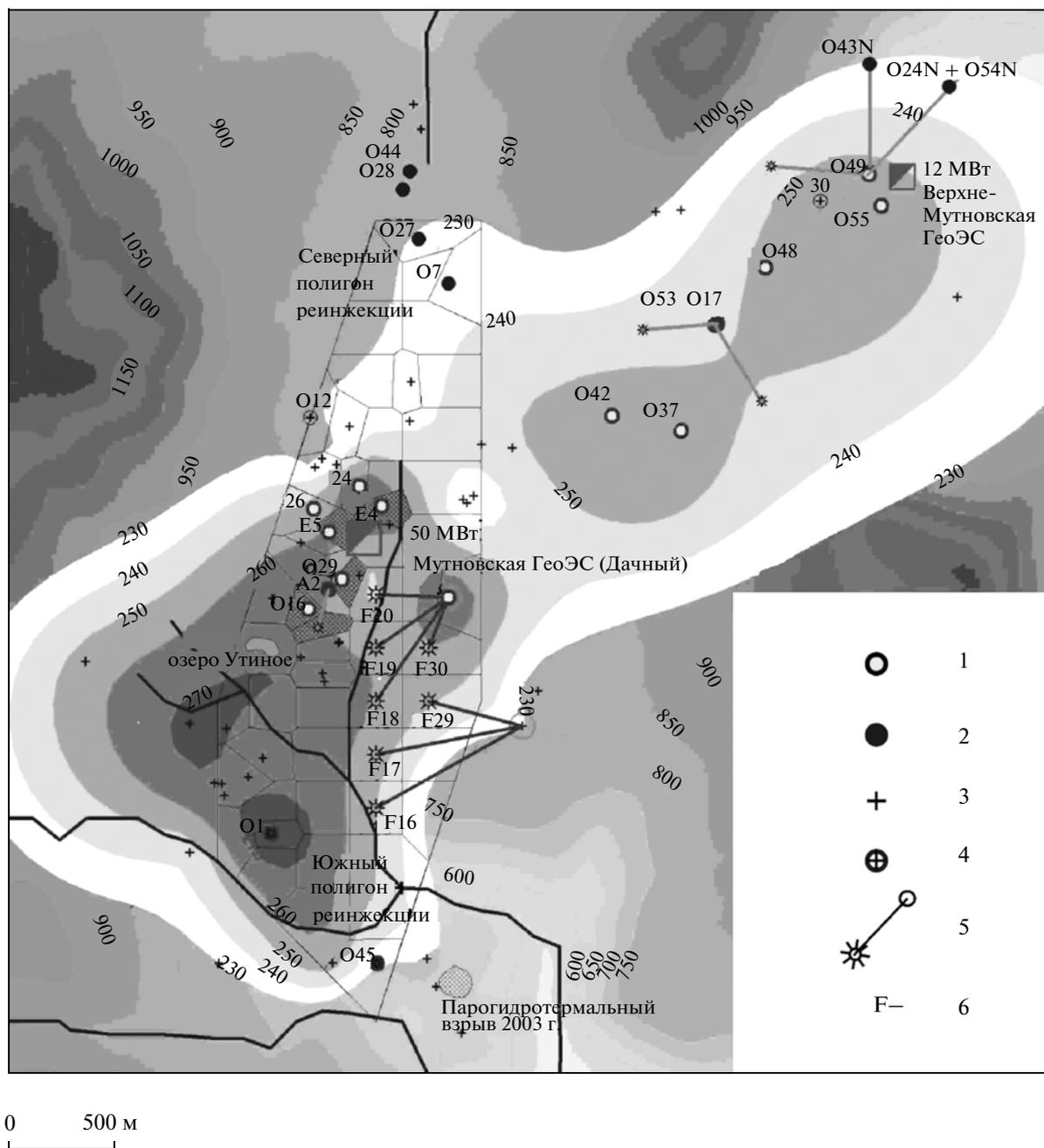


Рис. 4. Схема строения Мутновского геотермального месторождения.

Цифры:

1 – основные эксплуатационные скважины; 2 – нагнетательные скважины; 3 – ликвидированные скважины; 4 – наблюдательные скважины (30, 012); 5 – наклонные скважины; 6 – дополнительные (модельные) скважины.

На схеме показаны элементы топографии и распределение температуры на абс. отм. –250 м. Границы схемы соответствуют границам численной модели из работы [Kirjukhin, 1996]; внутренняя сетка – детальной модели продуктивной зоны “Основная” [Kirjukhin и др., 2005, Kirjukhin, Vereina, 2005].

соединены с соответствующими элементами продуктивной зоны “Основная”; вычислительная сетка, соответствующая продуктивной зоне, построена аналогично [Kirjukhin и др., 2005]. Всего в вычислительной модели было использовано 378 элементов [Kirjukhin, Vereina, 2005].

Массовые и тепловые источники и стоки на модели, распределение проницаемости и граничные условия были заданы аналогично [Kirjukhin и др., 2005] (рис. 5).

Моделирование естественного состояния Мутновского геотермального месторождения, заключа-

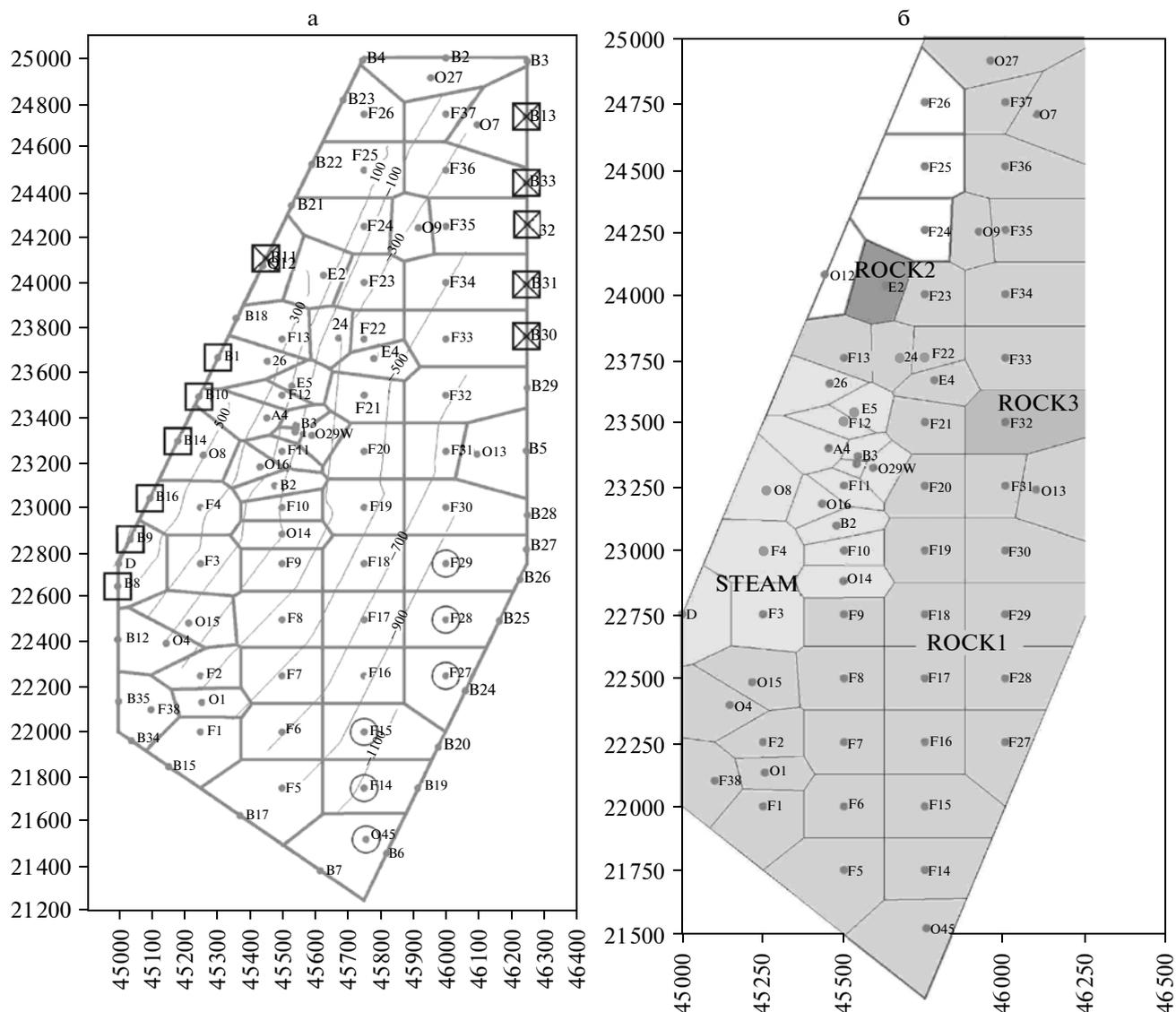


Рис. 5. Вычислительная сетка в плане (а) и расчетное распределение проницаемости пород (б) продуктивной зоны «Основная» участка Дачный Мутновского месторождения [Кирюхин и др., 2005, Kiryukhin, Vereina, 2005].

лось в ре-калибровке модели [Кирюхин и др., 2005] с учетом расширения вычислительной сетки и включения в нее массива вмещающих горных пород [Kiryukhin, Vereina, 2005]. Для ре-калибровки модели использовались данные по давлению, температуре и фазовому состоянию в ключевых элементах модели [Кирюхин и др., 2005]. В целом получена удовлетворительная сходимость между модельными и фактическими данными по температуре (среднее отклонение 3°C) и фазовому состоянию геотермального резервуара. Значения параметров модели естественного состояния по сравнению с данными приведенными в работе [Кирюхин и др., 2005], в целом существенно не изменились: общий расход восходящего потока теплоносителя оказался равным 54 кг/с, проницае-

мость в доменах (областях) STEAM, ROCK1, ROCK2 и ROCK3 на модели – 100 мД, 100 мД, 1 мД и 0.01 мД соответственно (см. рис. 5). Проницаемость массива вмещающих горных пород оценивается величиной 0.1 мД, при более высоких значениях сходимость модельных и фактических данных ухудшается.

Калибровка модели эксплуатации основана на данных по начальным термогидродинамическим характеристикам эксплуатационных скважин 016, 26, 029W, 4E, A2 и 5E (таблица), данных по изменению суммарного расхода пара и сепарата (скв. 016, 26, 029W, 4E, 5E, A2, O37 и 24) на сепараторе ГеоЭС в процессе эксплуатации 2002–2004 гг. (рис. 6). Коэффициенты продуктивности PI существующих эксплуатационных скважин подби-

Принятые начальные характеристики эксплуатационных скважин (016, 26, 029W, 4E, и 5E) для расчетов их коэффициентов продуктивности PI

№ скважины	Расход пароводяной смеси, кг/с	Устьевое давление, бар	Коэффициент продуктивности PI
016	17	7.5	0.124e-10
26	18	7.5	0.197e-10
4E	26.7	9	0.137e-11
029W	72.5	9	0.120e-10
5E	39	7	0.922e-11

рались для модели из условия сходимости начальных расходов скважин (см. таблицу).

$$Q = PI \sum \frac{k_r \rho \beta}{\mu \beta} (P_r - P_b(Q, h)), \quad (1)$$

Модель динамики взаимодействия “резервуар–скважина”

В развитие подхода, изложенного в работе [Кирюхин и др., 2005], для описания динамики взаимодействия “резервуар–скважина” вместо подпрограммы DEBIT использовалась внутренняя подпрограмма TOUGH2 V2.0 [Kiryukhin et al., 2010]:

где Q – расход скважины, кг/с, PI – коэффициент продуктивности, m^3 , k – относительная проницаемость, ρ – плотность теплоносителя, kg/m^3 , μ – вязкость теплоносителя, $Pa \cdot s$, β – индекс соответствующей фазы, P_r – давление в гидротермальном резервуаре (элементе модели, включающем рассматриваемую скважину), Pa , P_b – приведенное забойное давление в добычной скважине, Pa .

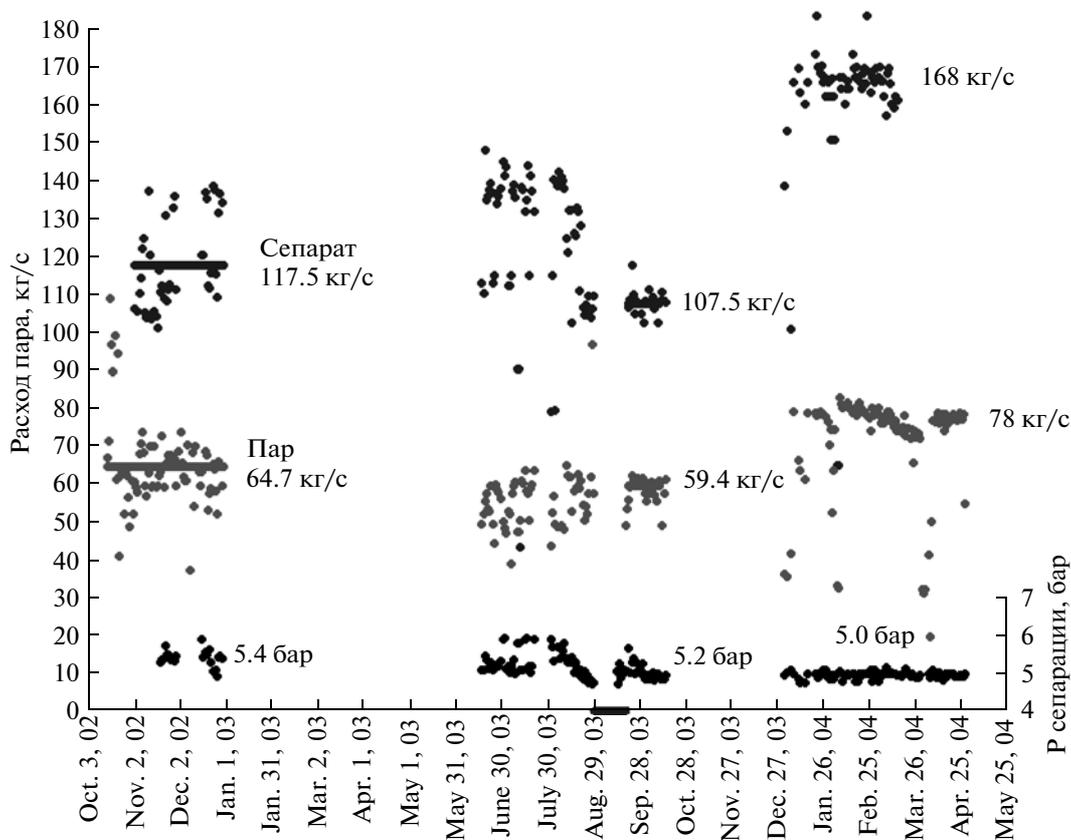


Рис. 6. Суммарный расход пара, отсепарированной воды и давление сепарата на Мутновской ГеоЭС (данные ОАО “Геотерм” 2004) [Kiryukhin, Vereina, 2005].

Эта подпрограмма позволяет учесть зависимость коэффициентов продуктивности скважин от изменения фазового состояния флюида и мобильности фаз в гидротермальном резервуаре, что характерно для Мутновского месторождения.

Моделирование условий обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС в течение 15 лет эксплуатации

Согласно работе [Кирюхин и др., 2005], для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт эл. необходимо 95 кг/с пара. Прогнозное моделирование показало, что исходная группа эксплуатационных скважин 016, 26, 029W, E4 и E5 не решает эту задачу – за 10 лет эксплуатации их суммарная паропроизводительность снизится с 64 до 33 кг/с, а при двукратном увеличении нагрузки – с 130 до 40 кг/с. Было показано, что использование семи дополнительных эксплуатационных скважин (F-скважин – F18, F19, F20, F30, F29, F17, F16) может обеспечить устойчивую суммарную паропроизводительность, достаточную для генерации 50 МВт эл. в течение 10 лет [Кирюхин и др., 2005].

В новых вариантах моделирования эксплуатации [Kiryukhin et al., 2010] был учтен теплообмен продуктивной зоны с вмещающими породами, а также зависимость коэффициентов продуктивности эксплуатационных скважин от паронасыщения, изменяющегося в процессе эксплуатации, и мобильности фаз.

В первом варианте (EX3) была рассмотрена эксплуатация пяти основных существующих продуктивных скважин (016, 26, E4, 029W, E5) в течение 15 лет. Согласно результатам моделирования, за 15 лет эксплуатации суммарная паропроизводительность группы рассматриваемых скважин должна уменьшиться с 64.4 до 31 кг/с, а давление в центральной наблюдательной скважине – с 44.7 до 32 бар. В целом эти результаты близки к полученным ранее [Кирюхин и др., 2005].

Далее были рассмотрены варианты с подключением семи дополнительных F-скважин (см. рис. 4). Позиции и геометрические характеристики этих скважин заданы аналогично первому варианту [Кирюхин и др., 2005; Kiryukhin, Vereina, 2005], коэффициенты продуктивности – равными $3.0 \times 10^{-12} \text{ м}^3$.

Во втором варианте (EX3A) рассмотрен следующий график подключения дополнительных модельных эксплуатационных скважин: F19 и F20 подключаются сразу, F18 – через 2 года, F30 – через 5 лет, F29 – через 9, F17 – через 12 и F16 – через 14 лет после начала эксплуатации (рис. 7). Согласно результатам моделирования, такой график подключения может обеспечить среднюю паропроизводительность 105.4 кг/с и средний суммар-

ный расход пароводяной смеси 272.7 кг/с в течение 15 лет эксплуатации, что соответствует 52.7 МВт эл. (предполагается, что 2 кг/с пара при давлении 7 бар достаточно для получения 1 МВт электроэнергии). Ранее был получен результат 97.8 кг/с для средней паропроизводительности в течение 10 лет эксплуатации [Кирюхин и др., 2005]. Таким образом, при учете теплообмена “продуктивная зона–вмещающие породы” и более точном описании зависимостей коэффициентов продуктивности эксплуатационных скважин от термодинамических параметров гидротермального резервуара, изменяющихся в процессе эксплуатации, модель позволяет получить более оптимистичные прогнозные результаты.

В следующих вариантах моделирования заданы те же условия, что и в предыдущем, базовом варианте (EX3A) и дополнительно рассмотрена реинжекция (EX3B, EX3C) и инфильтрация (EX3F).

Моделирование с учетом реинжекции

В варианте EX3B задана реинжекция в скважине O27 на Северном полигоне, с расходом 150 кг/с и энтальпией 700 кДж/кг. Прогнозные результаты мало отличаются от полученных в предыдущем варианте: средняя суммарная паропроизводительность и средний суммарный расход пароводяной смеси составляют 105.5 кг/с и 273.0 кг/с соответственно. Это объясняется тем, что модельная область реинжекции пространственно близка к заданным на модели инактивным граничным элементам (которые описывают контур разгрузки гидротерм в смежные гидрогеологические структуры, а именно, в бассейн р. Жировая). Косвенно, отсутствие значительного влияния реинжекции на эксплуатационные скважины участка Дачный обусловлено отсутствием заметного повышения в них содержания хлор-иона [Кирюхин и др., 2006а; Кирюхин и др., 2006б].

В варианте EX3C реинжекция (также с расходом 150 кг/с и энтальпией 700 кДж/кг) задана на Южном полигоне в скважине O45. Согласно результатам моделирования, суммарная средняя паропроизводительность должна повыситься до 115.6 кг/с в течение 12.5 лет эксплуатации, что соответствует 57.8 МВт электроэнергии. Однако эффект реинжекции на Южном полигоне неоднозначен: с одной стороны, реинжекция в зону глубинного питания гидротермального резервуара способствует росту производительности глубоких скважин (модельных F-скважин), но, с другой стороны, она приводит к снижению температуры (и давления) в приповерхностной пароконденсатной зоне и выводу из эксплуатации менее глубоких скважин (26, E5).

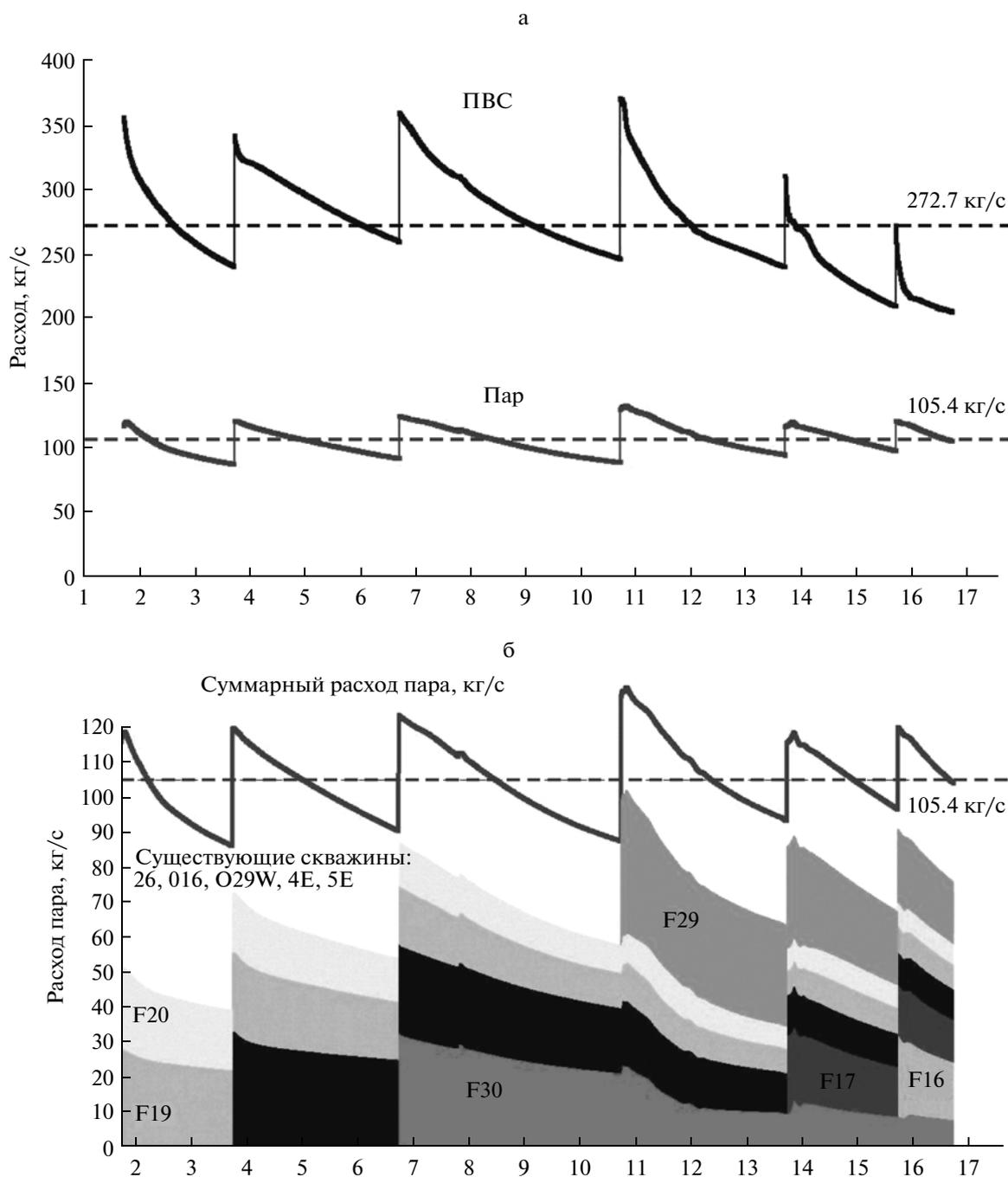


Рис. 7. Прогнозная модель (вариант EX3A) суммарного двухфазного расхода (а) и суммарной паропроизводительности (б) существующих 016, 26, E4, 029W, E5 и дополнительных F-скважин) на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения при эксплуатации в режиме полного обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт эл. [Kirjukhin et al., 2010].

Моделирование с учетом инфильтрации

В варианте EX3F (рис. 8) предполагаются те же условия, что и в базовом (EX3A), лишь дополнительно задана инфильтрация в центральной части участка Дачный с суммарным расходом 60 кг/с и энтальпией 420 кДж/кг. Вертикальная инфильтрация вод метеорного происхождения на участке

Дачный может быть вызвана их проникновением через затрубное пространство плохо зацементированных скважин (всего на участке Дачный пробурено 64 скважины), чему может также способствовать аномально низкое положение уровня вод в гидротермальном резервуаре (500–600 м ниже поверхности земли). Результаты моделирова-

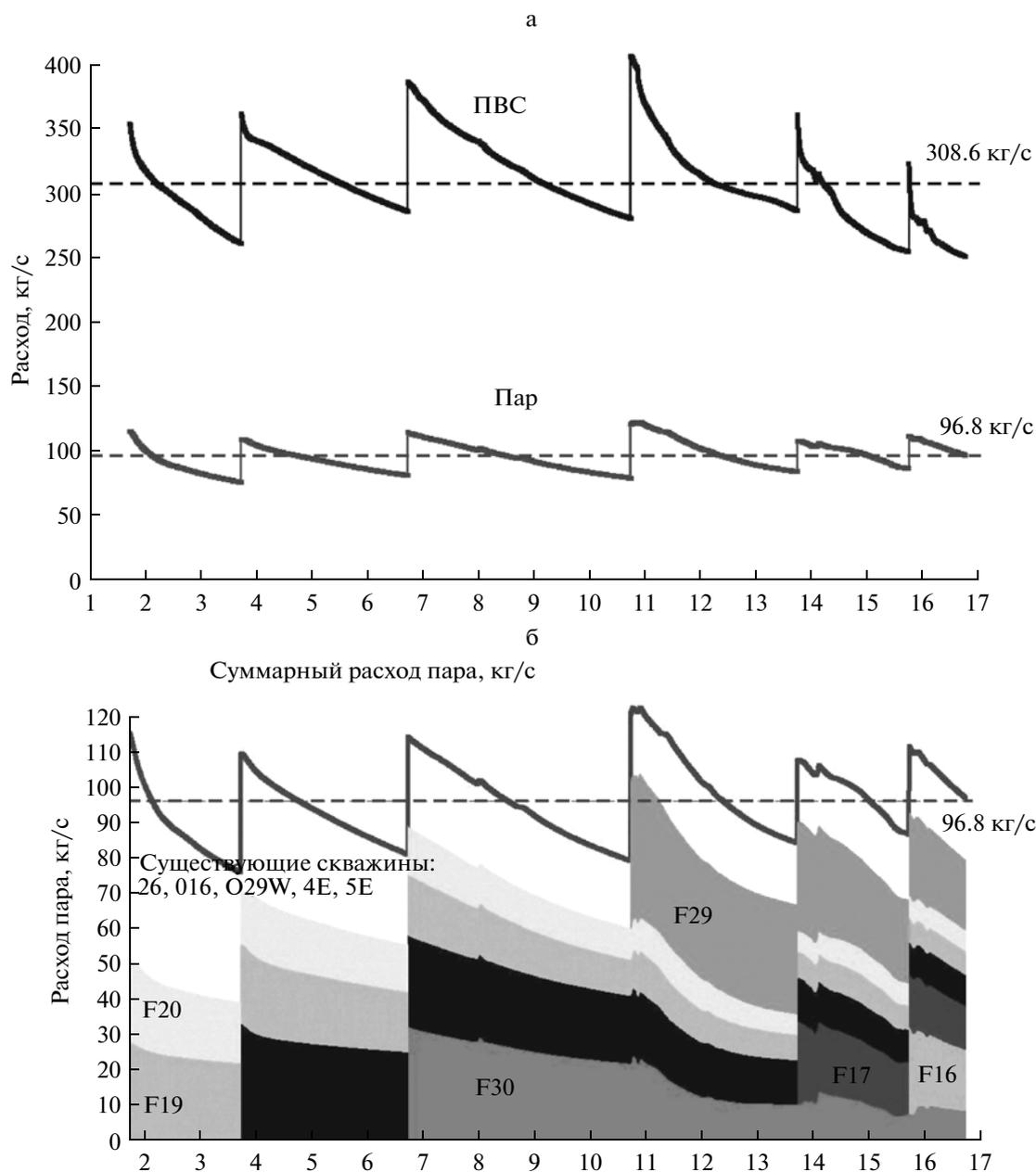


Рис. 8. Прогнозная модель (вариант ЕХ3F) суммарного двухфазного расхода (а) и суммарной паропроизводительности (б) существующих 016, 26, Е4, 029W, Е5 и дополнительных F-скважин на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения с учетом инфильтрации. [Kiryukhin et al., 2010].

ния показали, что средняя суммарная паропроизводительность и средний суммарный расход пароводяной смеси составляют 96.8 и 308.6 кг/с соответственно, что соответствует 48.4 МВт эл.

Реальный сценарий эксплуатации Мутновского месторождения

Для обеспечения паром Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт эл. на участке Дачный было решено использовать существующие скважины

на участке Верхне-Мутновский, а не бурить дополнительные F-скважины в соответствии с рассмотренными выше вариантами моделирования. Были дополнительно использованы скважины 037, 053N, 017N и 042 (участок Верхне-Мутновский), а также скважины 013 и 24 (участок Дачный). На рис. 9 показана динамика изменения суммарного расхода пароводяной смеси, суммарной паропроизводительности, а также паросодержания. Из графика видно, что с 2002 г. (год введения в эксплуатацию Мутновской ГеоЭС) и

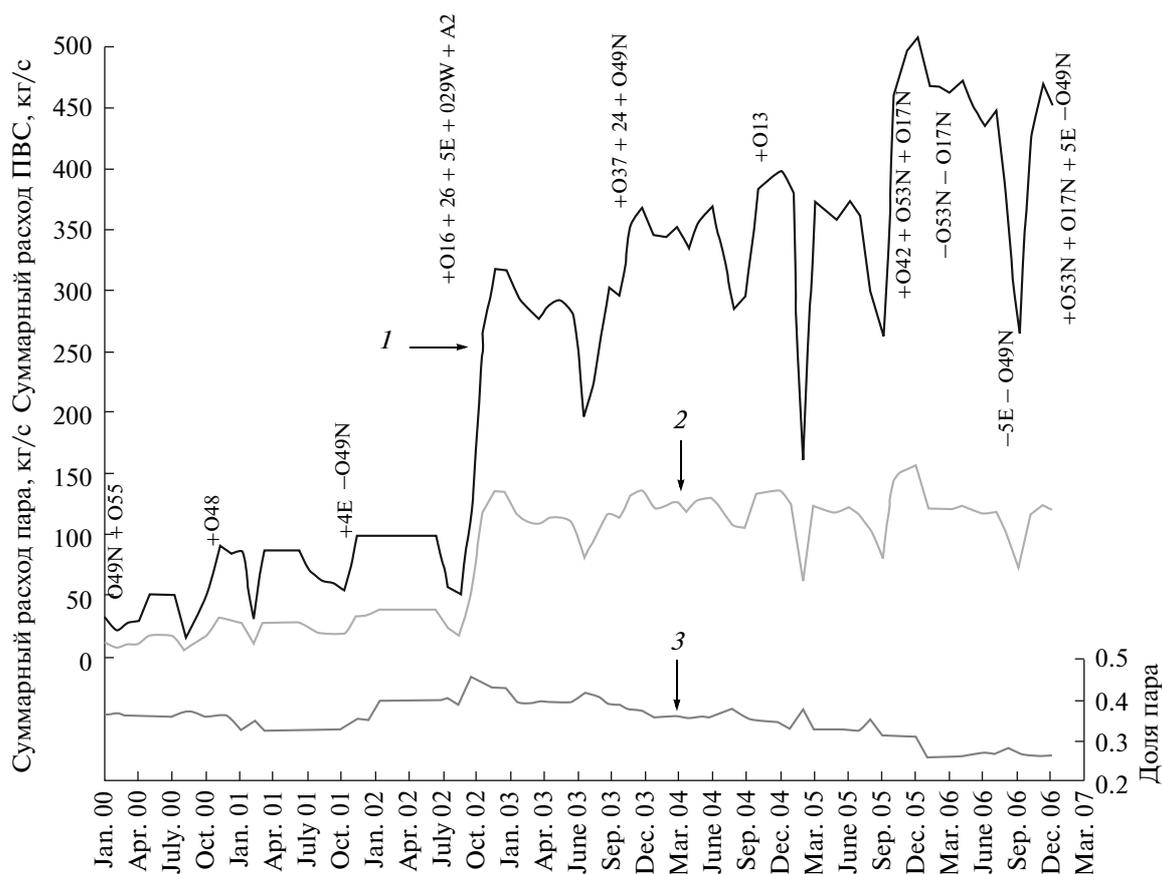


Рис. 9. Суммарный расход пароводяной смеси (1), суммарная паропроизводительность (2) и паросодержание (3) на Мутновском месторождении, по [Мальцева и др., 2007].

до конца 2006 года доля пара постепенно снижалась – с 0.46 до 0.27.

Нисходящая инфильтрация в гидротермальный резервуар косвенно подтверждается данными по газовому составу флюида из эксплуатационных скважин, в котором после начала эксплуатации возросла доля метеорных газов и отмечено снижение концентрации хлор-иона [Кириухин и др., 2006а, 2006б]. Таким образом, сценарий с притоком инфильтрационных вод в гидротермальный резервуар наиболее вероятен. Помимо ликвидированных скважин – “потенциальных агентов инфильтрации” (см. рис. 4), областью питания продуктивного резервуара может также служить искусственно запруженное озеро Утиное. Оно находится на бывшем участке термальной разгрузки, который гидравлически связан с резервуаром, залегающим на 500 м глубже.

Тем не менее, эффект инфильтрации метеорных вод в продуктивный резервуар в случае Мутновского месторождения неоднозначен. С одной стороны, водное питание резервуара может задержать снижение уровня воды в зону высоких температур и, следовательно, затормозит глубинные процессы кипения, которые стали при-

чиной серьезного парового взрыва вблизи скважины О45 в июне 2003 г. Эти процессы, происходящие в некоторых частях резервуара, косвенно подтверждаются существенным увеличением устьевого давления, наблюдавшимся, в частности, в скважинах 30 (до 34.5 бар) и О1 (до 50 бар) в 2008 г. В то же время инфильтрация приводит к снижению доли пара в отбираемом флюиде, что видно из фактических кривых производительности на рис. 9, а также из сравнения сценариев моделирования ЕХ3А и ЕХ3В (см. рис. 7 и 8 соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для Паужетского месторождения характерен существенный приток метеорных вод которые составляют 30% от полного объема извлекаемого флюида, что наблюдается не только на бывших участках термальной разгрузки, но главным образом (75%) в области ликвидированных скважин на междуречье Правой и Средней Паужетки, где до начала эксплуатации никакой естественной разгрузки не наблюдалось. Отсюда следует, что некоторые (плохо зацементированные) лик-

видированные скважины могут служить проводниками метеорных вод в резервуар, что приводит к охлаждению продуктивной зоны и отрицательно влияет на параметры эксплуатации. Моделирование эксплуатации месторождения показало, что, если изолировать такие искусственно созданные зоны инфильтрации, суммарная паропроизводительность может возрасти на 23.2%, и для поддержания существующей мощности электростанции потребуются меньше дополнительных скважин.

2. Многовариантное моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения позволило уточнить условия обеспечения паром Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт эл. в течение 15 лет, с использованием семи дополнительных скважин на участке Дачный. При наиболее вероятном сценарии моделирования предполагается, что эксплуатация месторождения сопровождается притоком сверху в гидротермальный резервуар инфильтрационных вод метеорного происхождения (модельная оценка расхода составляет 60 кг/с). Это подтверждается наблюдаемым снижением доли пара в течение первых четырех лет эксплуатации.

3. Следующая задача состоит в объединении результатов моделирования, в том числе возможностей обратного моделирования, опыта ранее проведенных модельных исследований (приближенная прямоугольная модель участков Дачный–Верхне-Мутновский [Kiryukhin, 1996], более детальная модель участка Дачный [Kiryukhin, 2005]), а также результатов всестороннего анализа газового состава флюида и геохимических исследований. Работа по созданию полномасштабной модели Мутновского месторождения, которая позволила бы реконструировать процессы, происходящие в ходе его эксплуатации и оптимизировать извлечение геотермальной энергии, выполняется в настоящее время.

Авторы выражают признательность В.М. Сугробову за ценные замечания при подготовке данной работы к печати. Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 12-05-00125 и ДВО РАН по проектам 12-III-A-08-170, 12-I-P27-04.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кирюхин А.В., Леонов В.Л., Словоцов И.Б. и др.* Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт // Вулканонология и сейсмология. 2005. № 5. С. 19–44.
- Кирюхин А.В., Москалев Л.К., Поляков А.Ю. и др.* Изменения термогидродинамического и газогидрохимического режима резервуара в процессе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения // Всероссийское совещание по подземным водам востока России (XVIII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). Иркутск, 2006а. С. 267–270.
- Кирюхин А.В., Пузанков М.Ю., Словоцов И.Б. и др.* Термодинамическое-химическое моделирование вторичного минералообразования в продуктивных зонах геотермальных месторождений // Вулканонология и сейсмология. 2006б. № 5 С. 26–41.
- Кирюхин А.В., Асаулова Н.П., Манухин Ю.Ф. и др.* Использование численного моделирования для оценки эксплуатационных запасов месторождений парогидротерм (на примере Паужетского геотермального месторождения) // Вулканонология и сейсмология. 2010а. № 1. С. 56–76.
- Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов. СПб.: Наука, 2010б. 395 с.
- Мальцева К.И., Пашкевич Р.И., Манухин Ю.Ф. и др.* Отчет по объекту “Пересчет эксплуатационных запасов теплоносителя по Мутновскому месторождению парогидротерм по состоянию на 31.12.2006 г.”. Елизово, 2007. 174 с.
- Finsterle S.* iTOUGH2 User’s Guide // LBNL-40040 Updated Reprint. Berkeley. CA. USA. 2007. 130 p.
- Haukwa C.* AMESH, a mesh creating program for the integral finite difference method: A User’s Manual // LBNL-45284. 1998. 53 p.
- Kiryukhin A.V.* Modelling Studies: Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // Geothermics. 1996. V. 26. № 1. P. 63–90.
- Kiryukhin A.V.* Modeling of the Dachny Site Mutnovsky Geothermal Field (Kamchatka, Russia) in Connection with the Problem of Steam Supply for 50 MW_e Power Plant // Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya. Turkey. 2005. 12 p.
- 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.
- Kiryukhin A.V., Asaulov N.P., Polyakov A.Y. et al.* Estimated effect of the exploitation induced infiltration in the Pauzhetsky and Mutnovsky geothermal fields, Kamchatka, Russia // Proceed. World Geothermal Congress 2010. Bali. Indonesia. 2010. 8 p.
- Kiryukhin A.V., Vereina O.B.* Modelling of the fault type geothermal reservoir (Dachny site, Mutnovsky geothermal field) // Proceedings 30th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University/ Stanford. California. USA. 2005. SGP-TR-176. 8 p.
- Pruess K., Oldenburg C., Moridis G.* TOUGH2, user’s guide version 2.0 // LBNL-43134 Berkeley. CA. USA. 1999. 197 p.

ESTIMATING THE INFLUENCE OF FILTERING DURING THE OPERATION OF THE PAUZHETKA AND MUTNOVSKII HIGH-TEMPERATURE GEOTHERMAL FIELDS, KAMCHATKA, RUSSIA

A. V. Kiryukhin^a, N. P. Asaulova^b, O. B. Vereina^c, and A. Yu. Polyakov^a

^a *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

e-mail: avk2@ksnet.ru

^b *GUP Kamchatskburgeotermiya, Village of Termalnyi, 684035 Russia*

^c *Institute of Geology, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii pereulok 7,
Moscow, 119017 Russia*

Received April 16, 2012

Abstract—It is shown that the productive reservoir received considerable quantities of meteoric water during the operation of the Pauzhetka geothermal field (1960–2007), which amounted to 30% of the total withdrawal of heat carrier. This led to cooling of the productive reservoir and reduced steam extraction. Modeling the operation process with the infiltration zones sealed shows that steam extraction can be enhanced by 23.2%. Multi-option modeling for the operation of the Dachnyi site of the Mutnovskii geothermal field shows that the most-likely scenario is infiltration of meteoric water with a discharge of about 60 kg/s into the productive reservoir from above. These results are consistent with the decrease in the steam concentration during the first 4 years of operation.