

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

### Оценка изменения расхода теплоносителя геотермальных электростанций при модификации системы его транспортировки

Шулюпин А. Н., доктор техн. наук  
Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск  
Любин А. А., Чернев И. И., инженеры  
ОАО «ГЕОТЕРМ», Петропавловск-Камчатский

Предложен метод расчета изменения расхода теплоносителя при модификации системы его транспортировки. Метод учитывает как увеличение расхода добычных скважин при снижении гидравлических сопротивлений в системе транспортировки, так и увеличение перепада давления в связи с ростом расхода. Даны рекомендации по практическому использованию предложенного метода. В качестве примера представлена оценка увеличения расхода теплоносителя, поставляемого на Мутновские ГеоЭС, при реконструкции устьевой обвязки скважин.

**Ключевые слова:** геотермальная электростанция, система транспортировки теплоносителя, добычная скважина, месторождение парогидротерм.

Использование глубинной теплоты Земли является динамично и устойчиво развивающимся направлением мировой энергетики. Обладая хорошей ресурсной базой, Россия занимает 14-е место в мире по установленной мощности геотермальных электростанций (ГеоЭС) [1]. Действуют пять ГеоЭС суммарной мощностью 83,7 МВт (три — на Камчатке — 76,5 МВт, две — на Курилах — 7,2 МВт). Добычные скважины разрабатываемых месторождений парогидротерм России выводят на поверхность теплоноситель в виде пароводяной смеси. На Камчатке геотермальная энергетика успешно конкурирует с ТЭЦ, используемыми в качестве топлива природный газ, даже в условиях дотаций на его потребление, хотя в мировой практике преференции принято предоставлять нетрадиционным направлениям энергетики.

Добычные скважины имеют тенденцию к снижению производительности в процессе эксплуатации, поэтому со временем на ГеоЭС возникает дефицит пара. Одним из направлений увеличения расхода поставляемого на станцию пара является совершенствование системы транспортировки теплоносителя. Расход скважин зависит от устьевого давления. При фиксированном давлении на входе в станцию уменьшение перепада давления в системе транспортировки позволяет снизить устьевое давление и увеличить расход скважины. На Мутновских ГеоЭС (Камчатка, установленная мощность — 62 МВт), где теплоноситель транспортируется в виде пароводяной сме-

си, снижение перепада давления осуществлялось путем замены П-образных компенсаторов сильфонными, спрямления проложенных змейкой трубопроводов, ликвидации нефункциональной запорной арматуры и др. На Паужетской ГеоЭС (Камчатка, установленная мощность — 14,5 МВт), где реализуется раздельная транспортировка пара и воды, снижение перепада давления возможно за счет улучшения условий транспортировки смеси до сепаратора, замены сепаратора, перераспределения нагрузки между магистральными паропроводами.

Вместе с тем увеличение расхода скважины приводит к возрастанию перепада давления в системе транспортировки, что снижает эффективность проводимых мероприятий. Очевидно, перед принятием решения о целесообразности того или иного мероприятия по совершенствованию системы транспортировки теплоносителя необходимо определить ожидаемое приращение расхода. Для этого нужен метод, учитывающий реакцию скважины на снижение устьевого давления и реакцию системы транспортировки на увеличение расхода.

Общей точкой системы транспортировки теплоносителя и добычной скважины является ее устье (выход из скважины и вход в систему). Согласованное решение для характеристик скважины и системы транспортировки следует искать в совпадении давления в устье. В данном случае характеристикой скважины служит график зависимости устье-

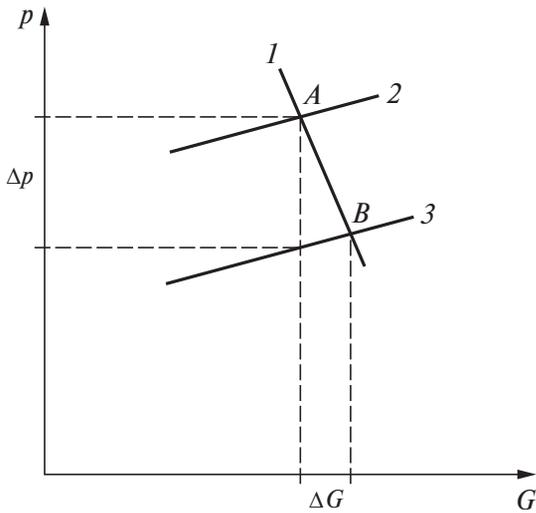


Рис. 1. Взаимосвязь устьевого давления и расхода для скважины и системы транспортировки:

1 — характеристика скважины; 2 и 3 — характеристики системы транспортировки до и после модификации; A и B — рабочие точки до и после модификации

евого давления от расхода. Учитывая фиксированное значение давления на входе в станцию, характеристикой системы транспортировки является график зависимости давления на входе в систему (устье скважины) от расхода. При этом рабочая точка устьевого давления будет соответствовать пересечению указанных графиков.

Увеличение расхода теплоносителя можно определить по разности расходов, полученных графическим методом для модифицированной и прежней систем транспортировки. Однако, как показала практика, построение требуемых графиков — непростая задача, предполагающая большой объем вычислений и допускающая существенную погрешность. Сократить объем вычислений и привязать характеристику системы транспортировки к наблюдаемым перепадам давления позволяет анализ изменений графиков. Модификация системы транспортировки не затрагивает скважину, следовательно, характеристика скважины остается неизменной. При уменьшении перепада давления в системе транспортировки ее характеристика 3 располагается ниже характеристики 2 (см. рис. 1). Принимая в первом приближении для рассматриваемой области, что характеристики 2 и 3 — прямые и параллельные линии, нетрудно получить формулу

$$\Delta G = \frac{\Delta p}{-(\partial p / \partial G)_w + (\partial p / \partial G)_p}, \quad (1)$$

где  $\Delta G$  — увеличение расхода теплоносителя;  $\Delta p$  — снижение перепада давления в системе транспортировки, определяемое при текущем расходе (в точке A);  $(\partial p / \partial G)_w$  и  $(\partial p / \partial G)_p$  — изменение устьевого давления при изменении расхода (производные устьевого давления) для скважины и системы транспортировки.

Снижение перепада давления в системе транспортировки в формуле (1) обуславливается осуществляемой модификацией. Оно соответствует конкретному расходу, поэтому его определение для конкретной модификации не представляет большого труда.

Зная текущий перепад давления в системе транспортировки и полагая его зависимость от расхода квадратичной, соответствующую производную вычисляем по формуле

$$(\partial p / \partial G)_p = 2\Delta p_s / G, \quad (2)$$

где  $\Delta p_s$  — перепад давления в системе транспортировки;  $G$  — текущий расход скважины.

Взаимосвязь расхода и устьевого давления (график производительности) в обязательном порядке определяется экспериментально для каждой скважины после ее строительства. Для этого проводятся измерения при трех-четырёх ступенях устьевого давления. Однако в процессе эксплуатации производительность и соответствующий график могут существенно измениться. В состав мониторинга разработки Мутновского месторождения парогидротерм включено периодическое (примерно 1 раз в 2 года) опробование скважин с определением взаимосвязи устьевого давления и расхода.

Если текущее значение расхода равно (в пределах погрешности измерений) расходу на экспериментальном графике производительности, соответствующему текущему устьевому давлению, изменение устьевого давления при изменении расхода следует определять по экспериментальному графику производительности. Разумеется, определяемое значение производной должно соответствовать текущему устьевому давлению, т. е. интервал практического определения изменения давления на графике должен включать текущее устьевое давление. Не рекомендуется использовать экстраполяцию графиков производительности в случае выхода текущих значений из области данных проведенных измерений. В области малых расходов может измениться знак производной, а в области высоких расходов возможно достижение критического режима, характеризующегося неизменностью расхода при дальнейшем снижении давления.

Если нет пригодных для определения производных характеристики скважины экспериментально полученных графиков производительности, можно воспользоваться расчетным определением необходимых графиков. Для этого по значению расходных параметров при текущем эксплуатационном давлении в устье с помощью расчетов по применимой для соответствующих условий математической модели течения в скважине рассчитывается давление в забое. Как показано в [2], принимая забойное давление неизменным, для различных расходов можно рассчитать устьевые давления, т. е. получить графики производительности, используя даже простейшую модель. Более точно расчетные графики производительности могут быть получены с учетом изменения забойного давления в зависимости от расхода, определяемого в результате моделирования процессов в геотермальном резервуаре [3].

На рис. 2 представлены результаты опробования, а также расчетные графики производительности, полученные в предположении о постоянстве забойного давления, для скважин Паужетского месторождения, имеющих наиболее широкий диапазон расходов. Расчет перепадов давления в стволе скважин осуществляли по модели WELL-4 [4]. Забойное давление вычисляли для одного из значений при опробовании. Расчетные графики достаточно хорошо согласуются с результатами опробования, что подтверждает возможность расчетного определения графиков производительности предложенным способом.

Рассмотрим применение предложенного метода для оценки изменения расхода в случае реализации одного из предложений по улучшению системы транспортировки теплоносителя Мутновской ГеоЭС. Теплоноситель в виде пароводяной смеси поступает из скважин сразу в магистральный трубопровод, по которому транспортируется до станционных сепараторов. Отвод от скважины осуществляется через тройник под прямым углом. Установка плавного отвода позволит снизить коэффициент местного сопротивления на 1,0.

Определить снижение перепада давления за счет уменьшения местного сопротивления можно с помощью компьютерной программы MODEL, хорошо зарекомендовавшей себя при проектировании (подтверждено последующей эксплуатацией трубопроводов на Мутновских ГеоЭС) [5]. Данные о текущих расходных параметрах скважин представлены в табл. 1.

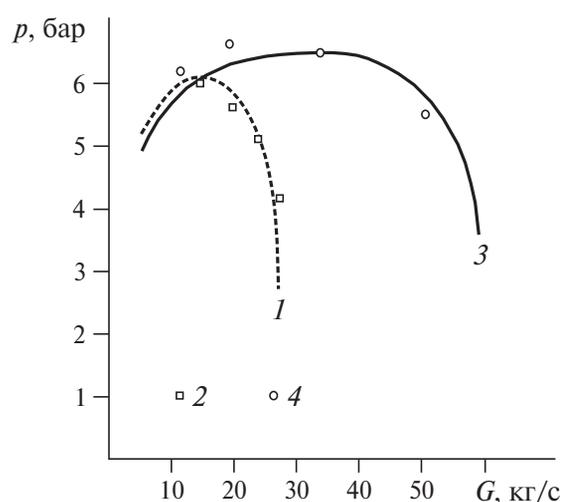


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные графики производительности скважин Паужетского месторождения парогидротерм:

1 и 2 — расчетные и экспериментальные данные по скважине 103 (опробование в 2013 г.); 3 и 4 — то же по скважине 123 (опробование в 1978 г.)

Таблица 1

Скважина	Устьевое давление, бар	Расход смеси, кг/с	Энтальпия смеси, кДж/кг
016	6,5	9,3	2490
026	6,7	14,8	2380
029W	8,5	59,5	1150
4Э	8,0	20,9	1110
037	9,6	21,5	1200
013	6,8	27,8	1160
053	8,1	53,6	1120
042	8,4	69,9	1200
017	8,0	19,1	1190
048	9,1	60,6	1180
Гео-1	11,7	71,4	1420

Работы по мониторингу разработки Мутновского месторождения парогидротерм включают периодическое опробование добычных скважин с получением графиков производительности. Поэтому для определения производных характеристик скважин использовались актуальные опытные графики производительности. Результаты расчетов по предложенной методике представлены в табл. 2. Поскольку основным технологическим параметром на

Таблица 2

Скважина	$\Delta p$ , бар	$-(\partial p/\partial G)_w$ , бар · с/кг	$(\partial p/\partial G)_p$ , бар · с/кг	Увеличение расхода смеси, кг/с	Увеличение расхода пара, кг/с
016	0,03	1,471	0,091	0,02	0,02
026	0,07	1,724	0,084	0,04	0,03
029W	0,22	0,120	0,085	1,07	0,22
4Э	0,03	2,632	0,186	0,01	0
037	0,03	1,408	0,333	0,02	0,01
013	0,06	0,606	0,044	0,09	0,02
053	0,17	0,397	0,075	0,36	0,07
042	0,34	0,196	0,075	1,25	0,29
017	0,03	1,667	0,204	0,02	0,01
048	0,22	0,234	0,020	0,87	0,19
Гео-1	0,35	0,571	0,090	0,53	0,17
Итого				4,28	1,03

станции является расход пара, в последнем столбце приведено приращение его расхода, рассчитанное как произведение приращения расхода смеси на массовое расходное паросодержание, определяемое по энтальпии смеси для давления сепарации.

Данные табл. 2 показывают, что суммарное возрастание расхода смеси при установке отводов на добычных скважинах составит 4,3 кг/с (увеличение расхода пара — 1,0 кг/с). При этом значимое увеличение расхода пара ожидается только для скважин 029W, 042, 048 и Гео-1.

Предложенный метод удобен при решении практических задач. Его применяли для оценки комплекса мероприятий по повышению эффективности использования фонда добычных скважин Мутновского и Паужетского месторождений парогидротерм путем снижения гидравлических сопротивлений в системе транспортировки теплоносителя. В результате был разработан план мероприятий, позволяющих увеличить расход пара для Мутновских ГеоЭС на 4 кг/с, для Паужет-

ской ГеоЭС — на 5,1 кг/с. При этом получено представление об ожидаемом эффекте от конкретных мероприятий, что в совокупности с расчетом затрат стало основанием для решения вопроса о их целесообразности.

#### Список литературы

1. Bertani R. Geothermal power generation in the World 2005 – 2010. Update report. — Proceedings, World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 2010.
2. James R. Factors controlling borehole performance. — Geothermics, 1970, No 2.
3. Использование численного моделирования для оценки эксплуатационных запасов месторождений парогидротерм (на примере Паужетского геотермального месторождения) / А. В. Кирюхин, Н. П. Асаулова, Ю. Ф. Манухин и др. — Вулканология и сейсмология, 2010, № 1.
4. Шулюпин А. Н., Чермошнцева А. А. О расчете пароводяного течения в геотермальной скважине. — Журнал технической физики, 2013, т. 83, № 8.
5. Шулюпин А. Н., Чермошнцева А. А. Гидравлический расчет транспортировки пароводяного теплоносителя геотермальных электростанций. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2012, № 3 – 4.

ans714@mail.ru