

УДК 532.529: 621.1.016

## Тепловизионный метод исследования гидродинамических характеристик пароводяных геотермальных скважин

А. Н. Шулюпин, И. И. Чернев

*Рассматривается использование тепловой съемки для исследования гидродинамических процессов в системе транспортировки пароводяного геотермального теплоносителя. Приведены температуры поверхности устьевого обвязки скважин Мутновского месторождения. Выявлена существенная зависимость измеренной температуры от коэффициентов теплоотдачи. Отмечена возможность разработки бесконтактного метода определения расходных параметров скважин на основе тепловой съемки.*

PACS: 47.80.Fg

*Ключевые слова:* тепловая съемка, пароводяная смесь, давление, температура, коэффициент теплоотдачи.

### Введение

Использование глубинного тепла земли является устойчиво развивающимся направлением мировой энергетики [1]. Теплоноситель всех действующих геотермальных электростанций России и большинства аналогичных станций мира выводится на поверхность из недр Земли в виде пароводяной смеси. Особые свойства добываемого теплоносителя обуславливают появление специфических задач, связанных с гидродинамическими процессами [2]. В том числе до настоящего времени актуальной остается задача определения расходных параметров добычных скважин при совместной транспортировке пара и воды, активно используемой при освоении месторождений парогидротерм [3—5].

Основным параметром, определяющим гидродинамические процессы, является давление. Известно, что давление в пароводяной смеси связано с температурой линией насыщения. Заметим, что при совместном измерении давления и температуры, которая измерялась термометрами, помещенными в омываемые потоком гильзы, в раз-

личных элементах системы транспортировки пароводяного геотермального теплоносителя не наблюдалось отклонений от линии насыщения, превышающих допустимую погрешность измерений. Следовательно, для определения давления в пароводяной смеси достаточно измерить температуру. Определение давления по измерению температуры имеет важное преимущество — температура менее подвержена влиянию пульсаций, имеющих место в реальных условиях и затрудняющих непосредственное измерение давления.

Развитие тепловизионной техники делает привлекательной идею ее использования для практических задач геотермальной энергетики, связанных с измерением давлений. Заметим, что на практике часто необходимо знать не абсолютное давление, а разность давлений в определенных точках. Например, разность давлений при прохождении местного сопротивления может использоваться для характеристики расходных параметров смеси. Можно ожидать, что погрешность определения разности температур внутри канала течения по наружным измерениям меньше погрешности определения самих температур (в том числе с учетом характеристик тепловизоров).

Целью настоящей работы является определение возможности использования тепловой съемки для исследования гидродинамических процессов в системе транспортировки пароводяного геотермального теплоносителя. При этом решались задачи: оценить возможность использования тепловой съемки для изучения распределения давлений внутри каналов течения; оценить перспективы использования измерений внешней температуры для определения расходных параметров скважин.

Шулюпин Александр Николаевич, заместитель директора<sup>1</sup>.

Чернев Иван Иванович, заместитель главного инженера<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Институт горного дела ДВО РАН.

Россия, 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51.

Тел. 8 (4212) 32-79-27. E-mail: ans714@mail.ru

<sup>2</sup>ОАО «ГЕОТЕРМ».

Россия, 683009, г. Петропавловск-Камчатский,

ул. Ак. Королева, 60.

Тел. 8 (4152) 41-97-57.

E-mail: ChernevI@geotherm.rushydro.ru

Статья поступила в редакцию 23 марта 2015 г.

© Шулюпин А. Н., Чернев И. И., 2015

### Определение разности температур в потоке по наружным измерениям

Рассматривая задачу стационарного теплового потока от движущейся среды в трубе с радиусом, существенно превышающим толщину стенки, к наружному воздуху, для разности температур потока внутри трубы в различных ее областях трудно получить следующую формулу:

$$T_{m1} - T_{m2} = T_{o1} - T_{o2} + (T_{o1} - T_{a1}) \left( \frac{\alpha_{o1} \delta_1}{\lambda_1} + \frac{\alpha_{o1}}{\alpha_{i1}} \right) - (T_{o2} - T_{a2}) \left( \frac{\alpha_{o2} \delta_2}{\lambda_1} + \frac{\alpha_{o2}}{\alpha_{i2}} \right), \quad (1)$$

где  $T_{m1}$  и  $T_{m2}$  — температуры смеси внутри трубы (здесь и далее добавочный индекс «1» относится к области 1, «2» — к области 2),  $T_{o1}$  и  $T_{o2}$  — температуры внешней поверхности трубы,  $T_{a1}$  и  $T_{a2}$  — температуры воздуха снаружи,  $\alpha_{o1}$  и  $\alpha_{o2}$ ,  $\alpha_{i1}$  и  $\alpha_{i2}$  — коэффициенты теплоотдачи для внешней и внутренней поверхности,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности стенки трубы,  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — толщины стенки трубы.

Ожидая существенное превышение коэффициента теплоотдачи для внутренней поверхности над аналогичным коэффициентом для внешней поверхности, при условии  $\alpha_{o1} = \alpha_{o2} = \alpha$ ,  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ ,  $T_{a1} = T_{a2}$ , можно упростить формулу (1) до соотношения:

$$T_{m1} - T_{m2} = (T_{o1} - T_{o2}) \left( 1 + \frac{\alpha \delta}{\lambda} \right). \quad (2)$$

### Методика и результаты тепловой съемки

Для достижения поставленной цели необходимо, прежде всего, выявить возможность надежной регистрации тепловизорами перепада температур в близлежащих точках поверхностей трубопроводов пароводяной смеси на геотермальных месторождениях в стационарном режиме. Регистрация температурных полей производилась двумя тепловизорами, а именно, FLUKE Ti9 и FLIR E50. Вторая модель помимо теплового объекта для регистрации инфракрасного излучения имеет дополнительно обычную фотокамеру, позволяющую зафиксировать исследуемую часть поверхности детали на стандартном фотоснимке.

Измерения проведены на пяти эксплуатационных скважинах Мутновского месторождения парогидротерм (Камчатка) при температуре наружного воздуха  $-13$  °С. Температура воздуха внутри помещений, ограждающих оголовки скважин, составляла  $4-8$  °С. ИК-камера тепловизора

FLUKE Ti9 имеет тепловую чувствительность  $0,2$  °С и была настроена на температурный диапазон от  $-20$  °С до  $+250$  °С; ИК-камера тепловизора FLIR E50 также обладает тепловой чувствительностью  $0,2$  °С и имеет два температурных диапазона: от  $-20$  °С до  $+150$  °С и от  $0$  °С до  $+650$  °С.

Измерения носили пробный характер и осуществлялись на элементах скважинного оголовка, не имеющего теплоизоляции. Для измерений выбирались элементы, на которых ожидалось существенные градиенты давления в потоке, связанные с изменением траектории движения, причем исследуемые поверхности специально не подготавливались. Поверхности имеют различные значения коэффициентов излучения. Часть из них имеет ровную окраску серого цвета, которая в рабочем диапазоне по справочным данным имеет значение коэффициента излучения  $0,92-0,96$ . В некоторых случаях поверхности вообще не обработаны, имеют пятна ржавчины, и их коэффициент излучения равен  $0,89-0,98$ . Тепловизионные камеры были настроены на работу с коэффициентом излучения  $0,95$ , а его отличие от фактической величины компенсировалось введением поправочного коэффициента при обработке термограмм.

Полученные снимки в автоматическом режиме заносятся на карты памяти тепловизоров в специальном формате для сохранения термограмм. Для переноса изображений в этом формате на компьютер и обеспечения возможности количественного анализа температурных полей в различных зонах поверхности использовано специальное лицензионное программное обеспечение.

Расшифровка тепловизионных снимков и получение количественных данных о распределении температур по поверхности трубопроводов возможны двумя методами: точечным измерением и измерением осредненной температуры на площадках фиксированных размеров. В первом варианте производится регистрация температуры в каждой выбранной точке поверхности с точностью до десятых долей градуса. Опыт практического использования этого метода для решения поставленной задачи показал, что, по причине наличия микродефектов в объеме металла обследуемой детали, неравномерности толщины и неоднородности защитного слоя термокраски, а также ряда других факторов, температуры в соседних точках поверхности могут различаться на  $1-2$  °С. Это дает существенные разбросы экспериментальных данных и не позволяет с достаточной для технических приложений точностью прогнозировать форму исследуемых закономерностей. Применение статистического подхода для решения поставленной задачи потребует для обеспечения представительного объема информации на порядок и более

увеличения количества исходных данных. По этим причинам расшифровка термограмм выполнена вторым методом, при котором в автоматическом режиме регистрировалась средняя температура поверхности площадки размером 10×10 мм, выделенной вокруг исследуемой точки.

На рис. 1 представлена схема типовой обвязки устья скважин Мутновского месторождения и приведены результаты измерения температур для характерных точек на поверхности труб (на примере скважины А-2, характерная температура смеси 160 °С). В рабочем состоянии боковая и фонтанная задвижки закрыты, остальные задвижки открыты. Выбранные точки расположены в сечениях, отстоящих от входа в рабочее и боковое ответвление крестовины на расстоянии 1/3 диаметра труб, составляющего 0,25 м.

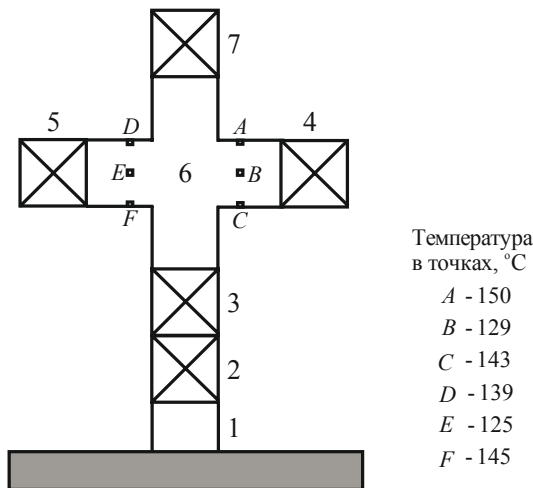


Рис. 1. Схема устьевой обвязки скважин Мутновского месторождения: 1 — ствол скважины; 2 — коренная задвижка; 3 — устьевая задвижка; 4 — рабочая задвижка; 5 — боковая задвижка; 6 — крестовина; 7 — фонтанная задвижка

### Обсуждение результатов измерений

Температура боковой поверхности горизонтальных труб оказалась существенно ниже температуры верхней и нижней части. Это, а также значительное отличие измеренных значений от характерной температуры в потоке, указывает на существенное влияние коэффициента теплоотдачи от внешней поверхности на ее температуру.

Максимальная температура отмечена в точке А. Это можно связать с наличием области повышенного давления, вызванного влиянием скоростного напора потока, поступающего из скважины и меняющего направление от вертикального к горизонтальному. Однако, прослеживая зависимость температуры нижней и верхней частей от расстояния от входа в рабочий отвод крестовины (рис. 2), предпочтение следует отдать другому объяснению. Рост температуры нижней

части в области, где с точки зрения гидродинамики должно быть пониженное давление, указывает на то, что температура на внутренней поверхности существенно зависит от коэффициента теплоотдачи. При этом коэффициент теплоотдачи для пароводяной смеси увеличивается в результате возмущений, имеющих место при изменении направления течения.

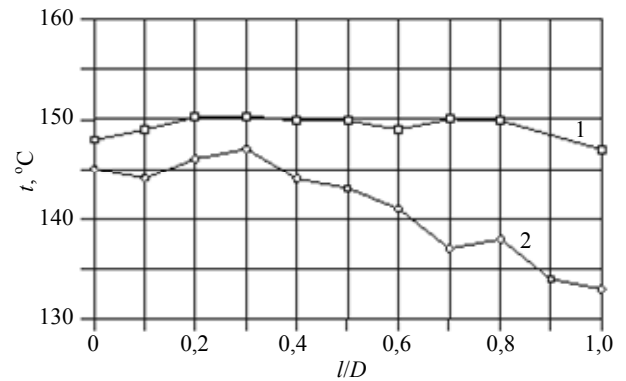


Рис. 2. Зависимость температуры верхней (1) и нижней (2) частей рабочего отвода крестовины от безразмерного расстояния (отношение длины l к диаметру D) от входа

Существенное влияние коэффициентов теплоотдачи для внешней и внутренней поверхностей на температуру внешней поверхности значительно сокращает возможности использования тепловой съемки для изучения распределения давлений внутри каналов течения. Расчет изменения температуры для последующего определения изменения давления по формуле (1), а не по упрощенной формуле (2), сопряжен со значительными погрешностями, связанными с определением коэффициентов теплоотдачи. Вместе с тем зависимость коэффициента теплоотдачи для внутренней поверхности от расходных параметров потока позволяет с оптимизмом смотреть на перспективы использования измерений внешней температуры для определения расходных параметров скважин. Например, в основе метода определения расхода скважины можно использовать измерение разности температур в точках А и D. В случае успеха в разработке такого метода, наличие бесконтактного способа измерения расходных параметров скважин будет значительным событием в практике освоения геотермальных ресурсов.

### Заключение

Основными результатом проведенной работы является выявление существенной зависимости температуры поверхности устьевой обвязки пароводяных скважин от коэффициентов теплоотдачи не только на внешней, но и на внутренней поверхности оборудования. Это позволило сделать следующие выводы.

1. Возможности использования тепловой съемки для изучения распределения давлений внутри каналов течения пароводяной смеси при освоении геотермальных месторождений являются ограниченными вследствие погрешностей, вносимых определением коэффициентов теплоотдачи.

2. Вследствие зависимости коэффициентов теплоотдачи для внутренней поверхности от расходных параметров, использование измерений внешней температуры является перспективным направлением для разработки бесконтактного метода определения расходных параметров пароводяных скважин, создание которого актуально при освоении геотермальных ресурсов.

В дальнейшем для определения зависимости разности температур в определенных точках устьевого обвязки от расходных параметров необходи-

мо проведение экспериментальных исследований в широком спектре расходов и термодинамических параметров. При этом перед проведением тепловой съемки необходима подготовка исследуемых поверхностей, обеспечивающая близость коэффициентов излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bertani R. // Proc. WGC. 2010. No. 0008.
2. Шулюпин А. Н. Вопросы гидравлики пароводяной смеси при освоении геотермальных месторождений. — Владивосток: Дальнаука, 2011.
3. Шулюпин А. Н. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 3. С. 15.
4. Ghaderi I. // Proc. WGC. 2010. No. 2501.
5. Umanzor C., Hall F., Buchanan R., et al. // Proc. WGC. 2015. No. 25027.

## Heat shooting as a research method of hydrodynamic characteristics of steam-water geothermal wells

A. N. Shulyupin<sup>1</sup> and I. I. Chernev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mining Institute of FEB RAS  
51 Turgeneva str., Khabarovsk, 680000, Russia  
E-mail: ans714@mail.ru

<sup>2</sup>Geotherm JSC  
60 Koroleva str., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683009, Russia  
E-mail: ChernevII@geotherm.rushydro.ru

Received March 23, 2015

*Consideration is given to use of heat shooting for investigation of hydrodynamic processes in a transport system of a steam-water geothermal heat agent. Surface temperatures of wellhead equipment in Mutnovskoe field are presented. Essential dependence of the measured temperature and the convective heat transfer coefficient is obtained. Possibility for development of the contactless method of determination of flow-rate well parameters on the basis of heat shooting is noted.*

PACS: 47.80.Fg

*Keywords:* heat shooting, steam-water mixture, pressure, temperature, heat transfer coefficient.

#### REFERENCES

1. R. Bertani, Proc. WGC, No. 0008, (2010).
2. A. N. Shulyupin, *Problems of Water-Steam Mixture Hydraulics at Development of Geothermal Fields* (Dal'nauka, Vladivostok, 2011) [in Russian].
3. A. N. Shulyupin, *Journal of Volcanology and Seismology* 7, 196 (2013).
4. I. Ghaderi, Proc. WGC, No. 2501, (2010).
5. C. Umanzor, F. Hall, R. Buchanan, et al., Proc. WGC, No. 25027, (2015).