

А.Н. Шулюпин, А.А. Чермошенцева, Н.Н. Варламова

НОВЫЕ ВЫЗОВЫ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПАРОГИДРОТЕРМ С ТРАНСПОРТИРОВКОЙ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ*

Аннотация. Выделены основные проблемы транспортировки пароводяной смеси, выявленные в ходе освоения месторождений парогидротерм: неустойчивые режимы транспортировки при низких скоростях потока и значительные гидравлические сопротивления при высоких скоростях. Рассмотрен отечественный опыт расчета трубопроводов пароводяной смеси, основанный на применении компьютерной программы MODEL, ориентированной на дисперсно-кольцевой режим течения. Приведены основные положения указанной программы и отмечена ее высокая эффективность при расчете трубопроводов для транспортировки смеси с высокими скоростями. На основании анализа отечественного и зарубежного опыта освоения месторождений парогидротерм, отмечены новые вызовы, обуславливающие актуальность разработки научных основ транспортировки пароводяной смеси с низкими скоростями с учетом современных представлений об устойчивости пароводяных течений. На разработанной научной основе целесообразно создание новой методики расчета перепада давления в трубопроводе, которая должна, в обязательном порядке, адекватно учитывать гравитационную составляющую, что позволит прогнозировать возникновение неустойчивых режимов эксплуатации скважин и принимать соответствующие решения по их устранению на стадии проектирования трубопроводов.

Ключевые слова: геотермальные ресурсы, месторождение парогидротерм, пароводяная смесь, скважина, трубопровод.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-43-49

Введение

Представить современную жизнь без топливно-энергетического комплекса невозможно. Освещение, отопление, подогрев пищи, водоснабжение — практически любая сфера деятельности осуществляется за счет потребления энергии. Для многих регионов, где топливо является привозным, а также с учетом поиска экологических решений для производства энергии в мире в целом, актуальным является вопрос использования альтернативных источников энергии, к числу которых относятся геотермальные ресурсы. Геотермальная энергия считается возобновляемой, не зависит от погодных усло-

вий, не несет в себе выбросов углекислого газа в атмосферу, а также доступна круглосуточно.

Более 80 стран используют геотермальные ресурсы как непосредственный источник энергии в тепловых насосах, бальнеологических бассейнах, системах отопления и т.д. [1].

Более 20 стран производят электроэнергию из геотермальных источников [2]. В таких странах как Коста-Рика, Сальвадор, Исландия, Кения, Филиппины, доля геотермальной энергетики составляет 15–22% от общего производства электроэнергии. В перспективе данным способом считается возможным произ-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00398 а.

водить около 8,3% общей мировой электроэнергии, позволяющей обеспечивать потребность 17% мирового населения [3].

В России геотермальная энергетика получила наибольшее развитие на Дальнем Востоке, где действуют 5 геотермальных электростанций (ГеоЭС). Источником теплоносителя для данных электростанций являются месторождения парогидротерм, добычные скважины которых выводят на поверхность пароводяную смесь. Наиболее крупное месторождение — Мутновское (Камчатка). Оно обеспечивает более 80% отечественной выработки электроэнергии на геотермальных ресурсах.

На Мутновском месторождении транспортировка теплоносителя от добычных скважин до ГеоЭС осуществляется по трубопроводам пароводяной смеси. Настоящая работа посвящена проблемам указанного вида транспортировки теплоносителя на месторождениях парогидротерм.

Проблемы транспортировки пароводяной смеси и их решения

В начале освоения месторождений парогидротерм широко использовалась раздельная схема транспортировки теплоносителя — сепарация осуществлялась вблизи устья скважин, пар по трубопроводам поставлялся на станцию, вода сливалась на рельеф. Ужесточение экологических требований и широкое внедрение возвратной закачки для поддержания пластового давления, вызвали необходимость транспортировки не только пара, но и воды к общему месту использования. В таких случаях целесообразно транспортировать пароводяную смесь в том виде, в котором ее получают из скважин, а разделение фаз осуществлять на общей сепарационной станции [4]. В этой связи в конце прошлого века начала активно внедряться схема двухфазной транспортировки [5—8]. Интерес к двухфазной транспортировке сохранился и в последующие годы [9—12].

Эксплуатация трубопроводов пароводяной смеси выявила две основные проблемы: неустойчивые режимы, характерные для низких скоростей транспортировки, и значительные гидравлические сопротивления, характерные для высоких скоростей транспортировки. В этой связи, на стадии проектирования трубопроводов возникла проблема выбора оптимального диаметра, который, с одной стороны, обеспечил бы минимальные гидравлические потери и, с другой стороны, обеспечил бы устойчивый режим транспортировки. Также возникла методическая проблема — выполнить расчет трубопровода в части взаимосвязи перепада давления с расходом, учитывая при этом зависимость расхода скважин от устьевого давления.

Сведений о конкретных путях решения указанных проблем в мировой практике крайне мало. Рассмотрим более подробно их решение при освоении отечественных месторождений. Для расчета трубопроводов пароводяной смеси А.Н. Шулюпиным и А.А. Чермошнцева была разработана компьютерная программа MODEL [13]. Изначально, программа задумывалась как упрощенная версия более масштабного продукта, основанного на сложной модели дисперсно-кольцевого потока [14]. Но простота применения, а главное достаточная точность, выявленная в ходе проведения экстренных расчетов, предопределили ее широкое использование.

Программа предполагает расчет перепада давления по значению параметров в одной узловой точке и применима для коротких труб.

Длинные трубы необходимо разбивать на короткие (до 200 м) расчетные участки. Параметры состояния определяются по уравнениям IFPWS-IF 97 [15]. Гидравлический расчет ориентирован на дисперсно-кольцевой режим течения. Для расчетного участка программа оп-

ределает соответствие паросодержания принципиальной возможности устойчивой транспортировки по условию

$$x > \frac{1}{1 + 1,6\sqrt{\rho' / \rho''}}, \quad (1)$$

где x — массовое расходное паросодержание; ρ' и ρ'' — плотности воды и пара.

Затем выдается рекомендация по выбору диаметра для устойчивой транспортировки согласно условию

$$D \leq 0,278 \left(\frac{G}{\rho} \right)^{0,4}, \quad (2)$$

где D — внутренний диаметр трубы; G — массовый расход смеси; ρ — плотность смеси, определяемая по гомогенной модели.

После ввода выбранного диаметра, рассчитывается перепад давления

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_m, \quad (3)$$

где Δp — общий перепад давления; Δp_f — перепад давления на трение; Δp_m — суммарный перепад давления на местных сопротивлениях.

Перепад давления на трение рассчитывается по формуле, полученной как упрощенное обобщение результатов численной реализации модели дисперсно-кольцевого течения [14],

$$\Delta p_f = \frac{0,02\rho(v - v_b)^2 L}{2D}, \quad (4)$$

где ρ , v — плотность и скорость смеси, соответствующие гомогенной модели; v_b — скорость движения поверхности трения, равная критической скорости движения насыщенной воды; L — длина расчетного трубопровода.

Падение давления на местных сопротивлениях рассчитывается по формуле

$$\Delta p_m = \frac{1,4\zeta\rho v^2}{2}, \quad (5)$$

где ζ — суммарный коэффициент местного сопротивления, определяемый как для однофазного потока.

Обычно, в качестве неизменного параметра задается давление в конечной

точке трубопровода (на входе в групповой стационарный сепаратор). Расходные параметры смеси зависят от устьевого давления. Практика показала, что найти решение с учетом влияния устьевого давления наиболее удобно графическим методом, когда на основании графика производительности скважины, отражающего зависимость расхода от устьевого давления, с помощью расчетов трубопровода строится график производительности системы скважина-трубопровод, отражающий зависимость расхода от давления на выходе из трубопровода [13]. Дальнейшие шаги предпринимаются уже на основе этого графика.

С использованием программы MODEL было рассчитано большинство действующих трубопроводов на Мутновском месторождении [13], обоснованно множество модификаций трубопроводов (замена П-образных компенсаторов на сильфонные, удаление нефункциональной запорной арматуры и т.д.), выполнен расчет двух трубопроводов на Паужетском месторождении. Во всех случаях прогнозные оценки по перепадам давления и расходам были подтверждены.

В работе [10] сравниваются 6 различных вариантов расчета перепада давления на трение с экспериментальными данными, полученными на геотермальном месторождении Лахендонг, Индонезия для горизонтальных труб диаметром 10–22 дюйма (0,254–0,559 м). Отмечено, что в использованных экспериментальных данных основным является дисперсно-кольцевой режим течения. Установлено, гомогенная модель дает один из наиболее близких результатов к экспериментам, особенно для труб большого диаметра. Заметим, что формула (4) также близка к классической гомогенной модели — введена лишь поправка на скорость движения поверхности трения. Введенная поправка (для условий Мутновского месторождения составляет

около 6 м/с) снижает расчетный перепад, но для трубопроводов с большим диаметром это снижение может компенсироваться повышенным значением коэффициента трения по сравнению с рекомендациями [10].

В формуле (4) коэффициент трения принят 0,02. К сожалению, в [10] нет четких рекомендаций по определению коэффициента трения, но указывается на его зависимость от шероховатости. Если определять коэффициент трения как функцию шероховатости, то для труб малого диаметра он, вероятнее всего будет больше 0,02, а для труб большого диаметра — меньше 0,02. Следовательно, расчетный перепад давления для труб большого диаметра по рекомендациям [10] снижается за счет коэффициента трения, а в формуле (4) за счет поправки на скорость движения поверхности трения. Таким образом, можно утверждать, что расчет по рассмотренным рекомендациям согласуется не только с отечественным опытом, но не противоречит представленным в [10] экспериментальным данным.

Новые вызовы при транспортировке пароводяной смеси

Как было отмечено, низкие скорости транспортировки смеси сопряжены с опасностью возникновения неустойчивости. В этой связи не рекомендуется объединять потоки от разных скважин в один магистральный трубопровод — отключение одной скважины способно существенно снизить скорость потока и вызвать неустойчивость. Однако, строительство индивидуальных трубопроводов от каждой скважины требует повышенных затрат. Не удивительно, что предпринимаются попытки объединения потоков от скважин [10]. Заметим, что на Мутновском месторождении также имеется подобный опыт. В этой связи становится актуальным вопрос о научном обосновании подобного решения, в том числе,

обоснования возможности транспортировки с пониженными скоростями.

Транспортировка пароводяной смеси при выполнении условия (2) сопряжена с заметными гидравлическими потерями. В этой связи встает вопрос о возможности либерализации данного условия с учетом конкретных обстоятельств. И основания для этого есть. Например, проектируя трубопровод от скважины 053 длиной 2240 м, и учитывая отсутствие восходящих участков, для снижения гидравлических потерь сознательно выбирался диаметр, превосходящий ограничение (2). Последующая эксплуатация подтвердила правомерность этого решения.

Опыт показывает, скважины со временем снижают производительность. В трубопроводе, изначально рассчитанном на определенный расход, со временем расход может упасть до значений, не обеспечивающих выполнение условия (2). Опять возникает вопрос о корректировке условия устойчивости течения.

Все перечисленные моменты требуют нового подхода к определению условий устойчивой транспортировки, дающего возможности расширения расчетной методики в область меньших скоростей. Заметим, что формула (4) принципиально ориентирована на высокие скорости, т.е. требуется радикальное изменение методики расчета.

Новый взгляд на проблему устойчивости пароводяных течений предложен в [16]. Показано, что устойчивость режима работы скважины напрямую связана с условиями течения в системе наземной транспортировки теплоносителя. Условие устойчивой работы скважины формулируется как

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{int}}}{\partial G} + \frac{\partial p_w}{\partial G} > 0, \quad (6)$$

где Δp_{int} — внутренний перепад давления в скважине (или сумма перепадов давления на трение, конвективное ускоре-

ние и гравитацию), Δp_w — устьевое давление, определяемое течением в системе наземной транспортировки.

Поскольку устьевое давление является суммой давления на выходе из трубопровода (в групповом стационарном сепараторе) и перепада давления в наземном трубопроводе, принимая давление на выходе постоянным, не зависящим от расхода скважины, условие (6) запишем в виде

$$\frac{\partial \Delta p_{int}}{\partial G} + \frac{\partial \Delta p_{tr}}{\partial G} > 0, \quad (7)$$

где Δp_{tr} — перепад давления в системе наземной транспортировки.

Согласно новым представлениям, трубопровод является фактором стабилизации режима работы скважины. При спонтанном увеличении расхода на устье, увеличивается перепад давления в трубопроводе, увеличивается устьевое давление, гасится развитие неустойчивости. При спонтанном снижении расхода на устье, снижается перепад давления в трубопроводе, снижается устьевое давление, вызывая компенсационное увеличение расхода.

Новый подход накладывает еще более строгие требования к объединению потоков от разных скважин. Магистральный трубопровод менее зависим от расхода одной скважины, что снижает второе слагаемое левой части (7), снижая устойчивость системы. В данном случае устойчивость системы будет определяться положительным значением первого слагаемого. Более того, спонтанное возмущение, запускающее механизм неустойчивости может наложиться на благоприятное для развития неустойчивости возмущение в магистральном трубопроводе.

Особое внимание приобретает транспортировка при низких скоростях, при которых трение не играет существенной роли. В таких условиях при наличии восходящих участков перепад давления в системе транспортировки будет существ-

венно зависим от гравитационной составляющей, которая может уменьшаться с ростом расхода. В этом случае возможно отрицательное значение второго слагаемого левой части (7), т.е. трубопровод будет играть дестабилизирующую роль.

Таким образом, новые вызовы указывают на актуальность разработки научных основ транспортировки пароводяной смеси с низкими скоростями с учетом современных представлений об устойчивости пароводяных течений. Затем, на разработанной научной основе, требуется создание методики расчета перепада давления в трубопроводе, которая должна в обязательном порядке адекватно учитывать гравитационную составляющую, что позволит прогнозировать возникновение неустойчивых режимов эксплуатации скважин и принимать соответствующие решения по их устранению на стадии проектирования трубопроводов.

Выводы

1. Несмотря на стремительное развитие в освоении альтернативных источников энергии, а также на заинтересованность многих стран в этом вопросе, на сегодняшний день имеется весьма ограниченные сведения о методиках расчета систем двухфазной транспортировки теплоносителя.

2. Существующие методики расчета трубопроводов для транспортировки пароводяной смеси рассчитаны на высокие скорости потока, характерные для дисперсно-кольцевого режима.

3. Известные методики расчета ограничиваются учетом гидравлических сопротивлений, обусловленных трением и местными сопротивлениями.

4. Новые вызовы указывают на необходимость разработки методики расчета трубопроводов пароводяной смеси для малых скоростей потока, учитывающей гравитационную составляющую перепада давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lund J. W., Boyd T. L.* Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, Vol. 60, pp. 66–93. doi: 10.1016/j.geothermics.2015.11.004.
2. *Bertani R.* Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 2016, Vol. 60, pp. 31–43. doi: 10.1016/j.geothermics.2015.11.003.
3. *Bertani R.* Geothermal energy: an overview on resources and potential // *International Geothermal Days*. Slovakia, 2009.
4. *Earth sciences*. Paris: UNESCO, 1973. No. 12.
5. *Lee K. C., Jenks D. G.* Ohaaki geothermal steam transmission pipelines // *Proceedings, 11-th New Zealand Geothermal Workshop*, 1989. Pp. 25–30.
6. *Wigly D. M.* Separation plant and pipework design – Ohaaki steam field // *Proceedings, 11-th New Zealand Geothermal Workshop*, 1989. Pp. 19–24.
7. *Delnov Y., Shulyupin A.* Geothermal power generation in Kamchatka, Russia // *Geothermal Resources Council Transactions*. Portland, 1996, Vol. 20, pp. 733–736.
8. *Zhao H. D., Lee K. C., Freeston D. H.* Geothermal two-phase flow in horizontal pipes // *Proceedings, World Geothermal Congress 2000*. Kyushu–Tohoku, 2000. Pp. 3349–3353.
9. *Ghaderi I.* Comprehensive comparison between transmission two-phase flow in one line and two line separately for 50 MWe power plant in Sabalan, Iran. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 2010, no. 2501
10. *Rizaldy, Zarrouk S. J.* Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipe-lines // *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, 2016. Pp. 1–5.
11. *Garcia-Gutierrez A., Martinez-Estrella J. I., Ovando-Castelar R., Vazquez-Sandoval A., Rosales-López C.* Thermal Efficiency of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne*, Australia, 19–25 April 2015, no. 25007.
12. *Cheik H. S., Ali H. A.* Prefeasibility design of single flash in Asal geothermal power plant 2x25 MW, Djibouti. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne*, Australia, 19–25 April 2015, no. 25030.
13. *Шулюпин А. Н.* Вопросы гидравлики пароводяной смеси при освоении геотермальных месторождений. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 262 с.
14. *Шулюпин А. Н., Чермошнцева А. А.* Модель дисперсно-кольцевого потока в геотермальной скважине // *Динамика гетерогенных сред в геотехнологическом производстве*. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГАРФ, 1998. – С. 23–35.
15. *Александров А. А.* Система уравнений IFPWS-IF 97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч.1. Основные уравнения // *Теплоэнергетика*. – 1998. – № 9. – С. 69–77.
16. *Shulyupin A. N.* Steam-water flow instability in geothermal wells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 105, pp. 290–295. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.092. **PLoS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Шулюпин Александр Николаевич*¹ – доктор технических наук, заместитель директора по научной и инновационной работе, e-mail: ans714@mail.ru,
Чермошнцева Ама Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, КамчатГТУ,
*Варламова Наталья Николаевна*¹ – аспирант, старший инженер,
e-mail: vnn-dvgups@mail.ru,

¹ Институт горного дела ДВО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2019. No. 2, pp. 43–49.

Development of hydrothermal mineral deposits with the transport of steam–water mixture: New challenges

*Shulyupin A. N.*¹, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research and Innovation, e-mail: ans714@mail.ru,
Chermoshenceva A. A., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: vnn-dvgups@mail.ru, Kamchatka State Technical University, 683003, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,

Abstract. The main problems connected with the transport of steam–water mixture revealed in the course of development of hydrothermal mineral deposits include: instability of transport at low flow rates and considerable hydraulic resistance at high flow rates. The domestic experience of steam–water mixture pipeline design using MODEL software for modeling dispersed–annular flows is analyzed. The key provisions of the software are presented, and its high efficiency in pipeline design for high-rate mixture flow is emphasized. Based on the analysis of the domestic and foreign experience gained in development of hydrothermal mineral deposits, the article sets new challenges which call for a scientific basis to be provided for steam–water transport at low rates with regard to the modern knowledge on the stability of steam–water flows. Using such scientific basis, it is expedient to create a new computation procedure for pipeline pressure difference in order that gravity component is duly taken into account, which will enable prediction of unstable modes in operation of wells and appropriate decision-making on elimination of such modes at the pipeline design stage.

Key words: geothermal reserves, hydrothermal deposit, steam–water mixture, well, pipeline.

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-43-49

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Federation for Basic Research, Project No. 16-05-00398 a.

REFERENCES

1. Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, Vol. 60, pp. 66–93. doi: 10.1016/j.geothermics.2015.11.004.
2. Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 2016, Vol. 60, pp. 31–43. doi: 10.1016/j.geothermics.2015.11.003.
3. Bertani R. *Geothermal energy: an overview on resources and potential*. International Geothermal Days. Slovakia, 2009.
4. *Earth sciences*. Paris: UNESCO, 1973. No. 12.
5. Lee K.C., Jenks D.G. Ohaaki geothermal steam transmission pipelines. *Proceedings, 11-th New Zealand Geothermal Workshop*, 1989. Pp. 25–30.
6. Wigly D.M. Separation plant and pipework design — Ohaaki steam field. *Proceedings, 11-th New Zealand Geothermal Workshop*, 1989. Pp. 19–24.
7. Delnov Y., Shulyupin A. Geothermal power generation in Kamchatka, Russia. *Geothermal Resources Council Transactions. Portland*, 1996, Vol. 20, pp. 733–736.
8. Zhao H.D., Lee K.C., Freeston D.H. Geothermal two-phase flow in horizontal pipes. *Proceedings, World Geothermal Congress 2000. Kyushu–Tohoku*, 2000. Pp. 3349–3353.
9. Ghaderi I. Comprehensive comparison between transmission two-phase flow in one line and two line separately for 50 MWe power plant in Sabalan, Iran. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress. Bali, Indonesia*, 2010, no. 2501
10. Rizaldy, Zarrouk S.J. Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipe-lines. *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop*. New Zealand, 2016. Pp. 1–5.
11. Garcia-Gutierrez A., Martinez-Estrella J.I., Ovando-Castelar R., Vazquez-Sandoval A., Rosales-López C. Thermal Efficiency of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*, 19–25 April 2015, no. 25007.
12. Cheik H.S., Ali H.A. Prefeasibility design of single flash in Asal geothermal power plant 2x25 MW, Djibouti. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*, 19–25 April 2015, no. 25030.
13. Shulyupin A.N. Voprosy gidravliki parovodyanoy smesi pri osvoenii geotermal'nykh mestorozhdeniy [Hydraulics of steam–water mixture in development of geothermal deposits], Vladivostok, Dal'nauka, 2011, 262 p.
14. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A. Model' dispersno-kol'tsevogo potoka v geotermal'noy skvazhine. Dinamika geterogennykh sred v geotekhnologicheskome proizvodstve [Model of dispersed–annular flow in geothermal well. Dynamics of heterogeneous media in the industrial geotechnology], Petropavlovsk-Kamchatskiy, Izd-vo KGARF, 1998, pp. 23–35.
15. Aleksandrov A.A. Sistema uravneniy IFPWS-IF 97 dlya vychisleniya termodinamicheskikh svoystv vody i vodyanogo para v promyshlennykh raschetakh. Ch.1. Osnovnye uravneniya [System of equations IFPWS-IF 97 for calculating thermodynamic properties of water and water steam for industry. Part 1. Basic equation], *Teploenergetika*. 1998, no 9, pp. 69–77. [In Russ].
16. Shulyupin A.N. Steam-water flow instability in geothermal wells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 105, pp. 290–295. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.092.