

УДК 662.997

Варламова Наталья Николаевна
младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000 г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: vnn-dvgups@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА
НАКЛОНА ТРУБОПРОВОДА
НА УСТОЙЧИВОСТЬ
ПАРОВОДЯНОГО ТЕЧЕНИЯ
ПРИ ОСВОЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ***

Аннотация:

Приведены результаты исследования влияния угла наклона трубопровода на устойчивую транспортировку пароводяного геотермального теплоносителя. Исследование выполнено с помощью новой разработанной математической модели пароводяного течения, учитывающей гравитационный эффект и данные современных исследований. Определены и представлены графически минимальные значения массового расхода пароводяной смеси в зависимости от угла наклона для типового трубопровода Паужетского месторождения парогидротерм, ниже которых имеется высокий риск неустойчивой работы системы добычи и транспортировки геотермального флюида и, как следствие, самозадавливания скважины. Отмечено, что опытные данные по трубопроводам Мутновского месторождения, используемые для верификации новой программы, показали хорошее согласование с расчетом, что позволяет рекомендовать программу для расчетов при проектировании и реконструкции трубопроводов на месторождениях парогидротерм.

Ключевые слова: геотермальная энергия, гравитационная неустойчивость, скважина, трубопровод

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.057

Varlamova Natalia N.,
Junior Researcher,
Mining Institute, Far Eastern Branch of RAS,
680000 Khabarovsk, 51 Turgeneva str.
e-mail: vnn-dvgups@mail.ru

**STUDY OF THE INFLUENCE
OF THE PIPELINE INCLINATION ANGLE
ON STEAM-WATER FLOW STABILITY
IN THE DEVELOPMENT
OF GEOTHERMAL FIELDS**

Abstract:

The paper presents study results of the influence of the pipeline inclination angle on the stable transportation of steam-water geothermal heat carrier medium. The study was carried out using a new developed mathematical model of the steam-water flow, taking into account the gravitational effect and the data of modern research. The minimum values of the mass flow rate of the steam-water mixture depending on the angle of inclination for a typical pipeline of the Pauzhetka steam-water field are determined and presented graphically. It is to note that the experimental data on the pipelines of the Mutnovka field, used to verify the new program, showed good agreement with the calculation, which makes it possible to recommend the program for calculations in designing and reconstruction of pipelines at steam-water fields.

Key words: geothermal energy, gravitational instability, well, pipeline

Введение

Перспектива столкновения с очередным энергетическим кризисом диктует современным исследованиям необходимость направить свое внимание на альтернативные источники энергии. Один из таких источников, набирающий популярность в последние десятилетия, – геотермальные ресурсы [1, 2]. Масштабы их освоения уже перестали ограничиваться дотационными проектами и все чаще финансируются на коммерческой основе. Ввиду дороговизны строительства новых скважин, актуальным также становится вопрос эффективного использования уже существующего фонда.

Современные разработки в области геотермальной энергетики связаны в основном с подъемом из недр Земли на поверхность геотермальных флюидов. Чаще всего (в том числе на двух геотермальных месторождениях на Камчатке – Паужетском и Мутновском) флюид представлен в виде смеси пара и воды.

Первое отечественное месторождение парогидротерм – Паужетское – было введено в эксплуатацию в 1966 г. Несмотря на то что добываемый из недр Земли теплоно-

* Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 20-05-00161 А

ситель на данном месторождении представлен в виде смеси пара и воды, большинство трубопроводов транспортируют до станции пар: сепарация происходит на устье скважины, а вода отводится по трубопроводам до места слива. Ранее в практике освоения подобных месторождений такая схема применялась достаточно широко. Однако ужесточение экологических требований и отечественный опыт эксплуатации другого месторождения парогидротерм – Мутновского – показал целесообразность использования системы двухфазной транспортировки теплоносителя [3], интерес к которой проявляется до сих пор [4 – 6]. В технологической схеме разработки Паужетского месторождения также присутствуют два трубопровода пароводяной смеси: от скважины 131 и от скважины 103.

Условие устойчивости

Механизм возникновения и развития макроскопической неустойчивости течения подробно рассмотрен в [7].

Само понятие неустойчивости связано с состоянием системы, внутренние механизмы которой способствуют нарастанию изначально малых возмущений. Отсутствие условий для возникновения неустойчивости определяется соотношением

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial G} > \frac{\partial p_1}{\partial G} - \frac{\partial p_2}{\partial G}, \quad (1)$$

где Δp – внутренний перепад давления в трубопроводе; p_1 и p_2 – внешнее давление на входе и на выходе из трубопровода.

В [7] показано, что данное соотношение характеризует динамический процесс, поэтому его целесообразно отнести к классу макроскопической темпоральной неустойчивости. При рассмотрении пароводяного течения в геотермальной скважине было выявлено определяющее значение гравитационной составляющей перепада давления для развития данной неустойчивости, а также отмечено, что внешнее входное давление не имеет существенного влияния на развитие неустойчивости [7]. Поэтому в случае с геотермальной скважиной условие отсутствия гравитационной неустойчивости рекомендовано в следующем виде:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial G} + \frac{\partial p_2}{\partial G} > 0. \quad (2)$$

Так как трубопровод является фактором, определяющим второе слагаемое (2) и влияющим на работу скважины (в масштабе рассмотрения системы добычи и транспортировки геотермального флюида), важно определить влияющие на его устойчивую работу факторы. В наклонных наземных трубопроводах также возможно развитие гравитационной неустойчивости. Как показывает практика, давление на выходе из трубопровода не имеет значительной зависимости от расхода. Например, на Паужетском месторождении парогидротерм трубопроводы пароводяной смеси подключены к индивидуальным сепараторам, давление в которых определяется давлением в общих для группы скважин магистральных трубопроводах. Следовательно, изменение внешнего давления на выходе из трубопровода практически не зависит от изменения расхода скважины (второе слагаемое (2) близко к нулю) и условие устойчивости в этом случае можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial G} > 0. \quad (3)$$

Влияние наклона трубопровода на устойчивость транспортировки смеси

Несмотря на постоянный рост доли вовлечения геотермальных ресурсов в мировую экономику, на практике существует крайне мало рекомендаций для расчета трубопроводов, транспортирующих пароводяную смесь. В отечественной практике освоения

геотермальных месторождений успешно применялась компьютерная программа MODEL, разработанная А.Н. Шулюпиным и А.А. Чермошнцевой. Однако математическая модель, которая лежит в основе данной программы, ориентирована на дисперсно-кольцевой режим течения пароводяной смеси и рассчитана на узкий диапазон скоростей [8]. Кроме того, модель не предполагает расчета гравитационной составляющей перепада давления, которая, с учетом современных исследований [7], оказывает существенное влияние на устойчивость двухфазного течения.

С учетом новых представлений была разработана новая программа для гидравлического расчета трубопроводов, транспортирующих геотермальный теплоноситель SWIP-S [9].

Так как крайне мало достоверных экспериментальных данных, соответствующих реальным условиям эксплуатации геотермальных месторождений или приближенных к этим условиям, то для верификации предложенной модели было принято решение использовать данные по расчетам с помощью программы MODEL в типовых условиях ее применимости для Мутновского месторождения. Ранее данная программа применялась для расчетов при проектировании и реконструкции трубопроводов на Мутновском месторождении. Сопоставление расчетного перепада давления с практически данными показало расхождение, не превышающее 3 %, что позволило считать сравнение расчетов достоверным и использовать новую программу для изучения других объектов в типовых условиях применения программы MODEL. Для верификации новой модели в нетиповых условиях были использованы опытные данные по трубопроводу от скважины Гео-1 Мутновского месторождения (длина 1050 м, перепад высот 110 м), показавшие хорошее согласование с расчетом.

Отрицательное значение индекса, находящегося в левой части неравенства (3), указывает на наличие условий, при которых возможно существование гравитационной неустойчивости. Исследование влияния наклона осуществлялось для типовых условий транспортировки пароводяной смеси на Паужетском месторождении – энтальпия смеси 800 кДж/кг, давление в узловой точке 3,5 бар. Расчет по предложенной модели выполнялся для трубопровода длиной 100 м с внутренним диаметром 0,3 м. Результаты расчета для восходящего и нисходящего потоков представлены на рис. 1 и 2. На рисунках видно, что неустойчивость имеет место не только в восходящих, но и в нисходящих потоках.

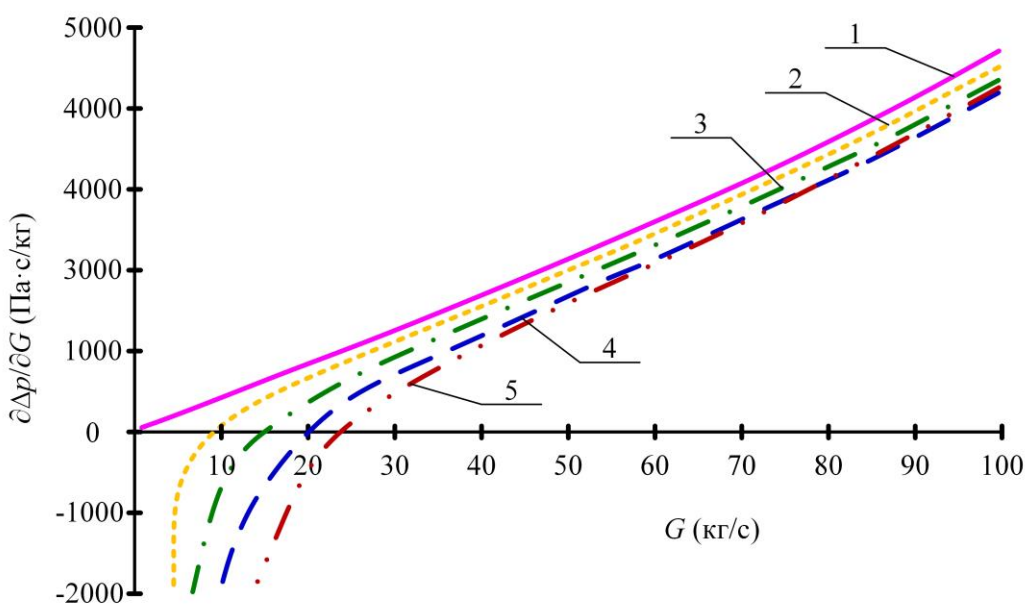


Рис. 1. Индекс устойчивости (левая часть условия (3)) для восходящего трубопровода: 1 – $\sin \theta = 0$; 2 – $\sin \theta = 0,25$; 3 – $\sin \theta = 0,5$; 4 – $\sin \theta = 0,75$; 5 – $\sin \theta = 1$

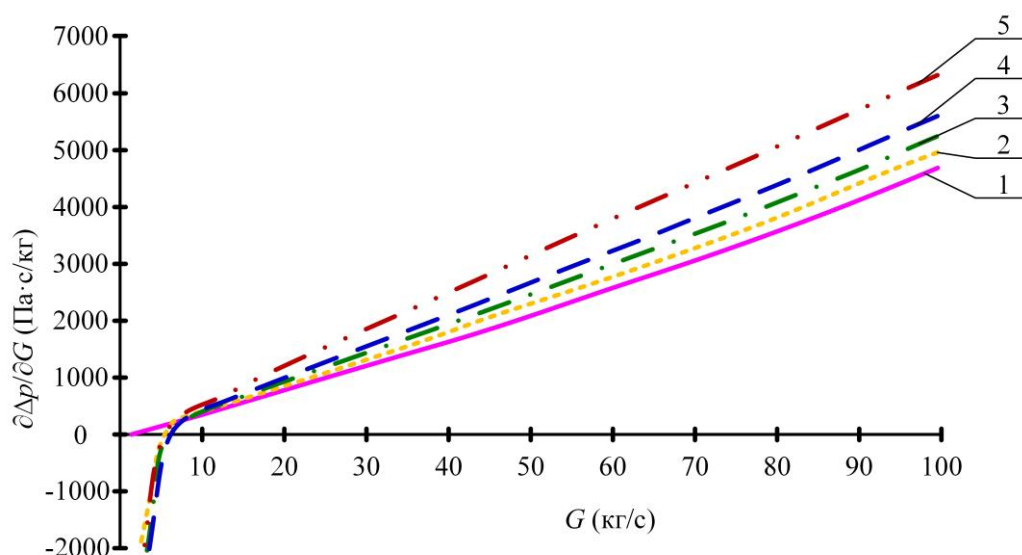


Рис. 2. Индекс устойчивости (левая часть условия (3)) для нисходящего трубопровода:
1 – $\sin \theta = 0$; 2 – $\sin \theta = -0,25$; 3 – $\sin \theta = -0,5$; 4 – $\sin \theta = -0,75$; 5 – $\sin \theta = -1$

В практике эксплуатации геотермальных месторождений повсеместно отмечается тенденция к снижению расхода скважин со временем, то есть даже если система работала продолжительное время в диапазоне расчетных расходов, существует риск возникновения гравитационной неустойчивости, который со временем увеличивается [10].

Возникновение неустойчивости в трубопроводе не только влияет на систему транспортировки, но и негативно сказывается на работе добычной скважины, увеличивая риск возникновения самодавливания, что может вывести ее из эксплуатации [11]. Опасным также является и возникновение неустойчивости на отдельных участках трубопровода: в этом случае формируется локальная неустойчивость, вызывающая пульсации, что значительно усложняет эксплуатацию трубопровода.

Заключение

При транспортировке пароводяной геотермальной смеси существует риск возникновения гравитационной неустойчивости (который со временем возрастает), что может привести к пульсационному режиму и к самодавлению скважины. Ранее используемая для расчетов программа MODEL не учитывает гравитационный эффект и рассчитана на узкий диапазон скоростей, что не позволяет применять ее за рамками предусмотренных условий.

С использованием новой программы был исследован типовой трубопровод, транспортирующий пароводяную смесь на Паужетском месторождении парогидротерм и выявлено, что в зависимости от угла наклона меняется минимальный массовый расход, обеспечивающий устойчивую транспортировку теплоносителя.

Применение новой модели расчета в дальнейшем позволит получать более точные результаты при проектировании или реконструкции системы добычи и транспортировки пароводяной смеси, что сведет к минимуму риск возникновения неустойчивости.

Список литературы

1. Bertani R., 2016. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, Vol. 60, pp. 31 - 43. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>
2. Lund J.W., Boyd T.L., 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, Vol. 60, pp. 66 - 93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>

3. Smith J.H., 1973. Collection and transmission of geothermal fluids. *Geothermal energy: review of research and development. Earth sciences*, pp. 97 – 105.
4. Rizaldy, Zarrouk S.J., 2016. Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines. *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop, New Zealand*, pp. 1–5.
5. Garcia-Gutierrez A., Martinez-Estrella J.I., Ovando-Castelar R., Vazquez-Sandoval A., Rosales-López C., 2015. Thermal Efficiency of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Proceedings World Geothermal Congress, 2015, Melbourne, Australia*, 19–25 April, № 25007.
6. Cheik H.S., Ali H.A., 2015. Prefeasibility design of single flash in Asal geothermal power plant 2x25 MW, Djibouti. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April*, № 25030.
7. Шулюпин А.Н., 2018. *Устойчивость режима работы пароводяной скважины*. Хабаровск: Амурпринт, 136 с.
8. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., 2012. Гидравлический расчет транспортировки пароводяного теплоносителя геотермальных электростанций. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, № 3 – 4, С. 28 - 37.
9. Свид. 2020660438 Российская Федерация. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. SWIP-S*. А.Н. Шулюпин, А.А. Чермошенцева, И.И. Чернев, Н.Н. Варламова; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук обособленное подразделение Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук. № 2020619195; заявл. 18.08.2020; зарегистр. 03.09.2020; опубл. 03.09.2020,1 с.
10. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., 2014. Оценка изменения условий в термоводоносном комплексе Паужетского месторождения парогидротерм. *Известия вузов. Горный журнал*, № 4, С. 82 – 88.
11. Варламова Н.Н., 2019. Проблемы неустойчивой работы скважины при парлифтной добыче геотермального флюида. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 178 - 181. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.178

References

1. Bertani R., 2016. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, Vol. 60, pp. 31 - 43. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>
2. Lund J.W., Boyd T.L., 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, Vol. 60, pp. 66 - 93. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
3. Smith J.H., 1973. Collection and transmission of geothermal fluids. *Geothermal energy: review of research and development. Earth sciences*, pp. 97 – 105.
4. Rizaldy, Zarrouk S.J., 2016. Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines. *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop, New Zealand*, pp. 1–5.
5. Garcia-Gutierrez A., Martinez-Estrella J.I., Ovando-Castelar R., Vazquez-Sandoval A., Rosales-López C., 2015. Thermal Efficiency of the Los Humeros Geothermal Field Fluid Transportation Network. *Proceedings World Geothermal Congress, 2015, Melbourne, Australia*, 19–25 April, № 25007.
6. Cheik H.S., Ali H.A., 2015. Prefeasibility design of single flash in Asal geothermal power plant 2x25 MW, Djibouti. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April*, № 25030.
7. Shulyupin A.N., 2018. *Ustoichivost' rezhima raboty parovodyanoi skvazhiny* [Stability of operating mode of the steam-water well]. Khabarovsk: Amurprint, 136 p.

8. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., 2012. *Gidravlicheskii raschet transportirovki parovodyanogo teplonositelya geotermal'nykh elektrostantsii* [Hydraulic calculation of the transporting of steam-water heat carrier medium on geothermal power plants]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, № 3 – 4, p. 28 - 37.

9. Svid. 2020660438 Rossiiskaya Federatsiya. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM. SWIP-S* [Certificate of state registration of the computer program. SWIP-S]. A.N. Shulyupin, A.A. Chermoshentseva, I.I. Chernev, N.N. Varlamova; pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Khabarovskii Federal'nyi issledovatel'skii tsentr Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk obosoblennoe podrazdelenie Institut gornogo dela Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk. № 2020619195; zayavl. 18.08.2020; zaregistr. 03.09.2020; opubl. 03.09.2020, 1 p.

10. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., 2014. *Otsenka izmeneniya uslovii v termovodonosnom komplekse Pauzhetskogo mestorozhdeniya parogidroterm* [Assessment of conditions changes in the thermal water-bearing complex of the Pauzhetskoye field of steam-water-thermae]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 82 – 88.

11. Varlamova N.N., 2019. *Problemy neustoichivoi raboty skvazhiny pri parliftnoi dobyche geotermal'nogo flyuida* [Problems of unstable well operation during steam-lift production of geothermal fluid]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, p. 178 - 181. DOI:10.25635/2313-1586.2019.02.178