УДК 532.529:620.91

Научная статья

Влияние геометрии трассы трубопровода на устойчивость пароводяного течения при эксплуатации ГеоЭС

А.Н. Шулюпин¹, А.А. Чермошенцева², Н.Н. Варламова¹

¹ Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51

² Камчатский государственный технический университет, 683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35

E-mail: ans741@mail.ru, allachermoshentseva@mail.ru, vnn-dvgups@mail.ru

Исследуются случаи существования неустойчивости потока, вызванной влиянием гравитационных сил в трубопроводах пароводяной смеси на геотермальных месторождениях. Представлена новая разработанная авторами математическая модель пароводяного течения, учитывающая гравитационный эффект и удовлетворяющая новым вызовам при освоении геотермальных месторождений с двухфазной транспортировкой теплоносителя. Показано влияние наклона трубопровода и рельефа трассы на гравитационную устойчивость течения. Даны рекомендации по гидравлическому расчету и строительству трубопроводов пароводяной смеси.

Ключевые слова: геотермальное месторождение, пароводяное течение, математическая модель, гравитационная неустойчивость, наклон трубопровода, рельеф трассы

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-143-153

Поступила в редакцию: 08.07.2020

В окончательном варианте: 22.07.2020

Для цитирования. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н. Влияние геометрии трассы трубопровода на устойчивость пароводяного течения при эксплуатации ГеоЭС // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 32. № 3. С. 143-153. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-143-153

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н., 2020

Введение

Использование геотермальных ресурсов для нужд электроэнергетики является перспективным, активно развивающимся направлением, развитие которого выходит за рамки дотационных проектов. В настоящее время освоение геотермальных ресурсов, как правило, осуществляются на коммерческой основе. Наряду с новыми

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00161

перспективными исследованиями, например, в области создания улучшенных геотермальных систем [1, 2] и извлечения геотермальной энергии без подъема глубинных флюидов на поверхность [3, 4], повышенное внимание уделяется вопросам эффективности использования уже существующих технологий.

Несмотря на развитие новых технологий, в основе современной геотермальной электроэнергетики лежит освоение гидротермальных ресурсов, связанное с подъемом на поверхность теплоносителя, чаще всего, в виде пароводяной смеси. Ужесточение экологических требований, широкое внедрение технологий закачки и развитие технологии использования энергетического потенциала жидкой фазы в двухконтурных энергоустановках вызвали необходимость транспортировки не только пара, но и воды к общему месту использования. При таком решении представляется целесообразным транспортировать теплоноситель в виде пароводяной смеси [5].

Двухфазная транспортировка теплоносителя начала внедряться в конце прошлого века [6], и активно используется в настоящее время [7]. В частности, такая технология принята основной на Мутновском месторождении (Камчатка), обеспечивающем выработку около 90 % всей отечественной электроэнергии на геотермальных ресурсах, и частично используется на втором по утвержденным запасам отечественном месторождении — Паужетском (Камчатка).

Практика транспортировки двухфазного геотермального теплоносителя выявила главную проблему — выбор оптимального диаметра трубопровода. При малом диаметре имеют место значительные потери давления в трубопроводе, что негативно отражается на количестве и качестве поставляемого на ГеоЭС теплоносителя. При большом диаметре увеличивается риск возникновения неустойчивого режима работы системы добычи и транспортировки теплоносителя, что способно сделать невозможным практическое использование скважин. В этой связи представляются актуальными исследования, направленные на выявление условий возникновения неустойчивых режимов транспортировки пароводяной смеси.

В настоящей работе на основе математического моделирования исследуется влияние геометрии трассы на устойчивость пароводяного потока. При этом используется новая математическая модель двухфазного течения, а также критерий, указывающий на возможность возникновения и развития гравитационной неустойчивости двухфазного потока [8].

Краткое описание математической модели

Механизм возникновения и развития гравитационной неустойчивости течения подробно рассмотрен в [8]. Возникновение неустойчивости связывается с наличием спонтанного изменения импульса (или расхода) потока. Механизм развития заключается в том, что увеличение/снижение импульса (или расхода) приводит к увеличению/снижению движущей силы за счет изменения плотности смеси и изменения силы тяжести, препятствующей движению. При этом отмечается общность природы данного явления с известной неустойчивостью Лединегга, которая не связана с гравитационным эффектом, а обуславливается особенностью трения в парогенерирующих каналах [9, 10].

Для геотермальной скважины условие отсутствия гравитационной неустойчивости течения предложено в виде [11]

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial G} + \frac{\partial p_w}{\partial G} > 0 \quad (1)$$

где Δp — внутренний перепад давления в скважине, p_w — внешнее устьевое давление, зависящее от условий течения вниз по потоку от устья.

Поскольку наземные трубопроводы имеют сложную геометрию трасс, включая наклонные, вплоть до вертикальных, участки, в них, также как в скважинах, имеют место гравитационные эффекты. Поэтому для трубопровода, рассматривая его как аналог скважины, применимо условие устойчивости в виде (1), где в данном случае под Δp принимается перепад давления в трубопроводе, а под p_w — внешнее давление на выходе из трубопровода. Заметим, что давление на выходе из трубопровода, как правило, не имеет существенной зависимости от расхода. Например, на Мутновском месторождении, трубопроводы пароводяной смеси подключены к групповым сепараторам, давление в которых не имеет значимой зависимости от расхода конкретной скважины. На Паужетском месторождении трубопроводы пароводяной смеси подключены к индивидуальным сепараторам, давление в которых определяется давлением в магистральных трубопроводах. В этом случае второе слагаемое левой части (1) близко к нулю, и условие устойчивости можно представить в виде

$$J = \frac{\partial \Delta p}{\partial G} > 0 \quad (2)$$

где J — индекс устойчивости, Δp — внутренний перепад давления в трубопроводе.

Используемая в настоящей работе математическая модель пароводяного течения в трубопроводе основана на выражении общего перепада давления через составляющие на трение, местные сопротивления и гравитацию

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

где Δp_f , Δp_m , Δp_g — составляющие на трение, местные сопротивления и гравитацию.

Составляющая на трение определяется интегрированием выражения, полученного компиляцией известных формул, применимых для близких по параметрам условий (гомогенная модель для труб большого диаметра [7] и двухскоростная модель для скважины [12])

$$dp_f = \frac{\lambda(\rho_l v_l^2(1 - \alpha) + \rho_g v_g^2 \alpha + \rho_w w^2)}{4D} dL \quad (4)$$

где λ — коэффициент трения, ρ_l и ρ_g — плотности воды и пара, v_l и v_g — усредненные по сечению скорости воды и пара, α — истинное объемное паросодержание (отношение объема газовой фазы к общему объему рассматриваемого элемента), ρ_w — плотность по гомогенной модели, w — приведенная скорость смеси, равная скорости по гомогенной модели, D — диаметр трубы, dL — длина элемента.

Для определения перепада давления на местных сопротивлениях использовалась формула, основанная на гомогенной модели

$$\Delta p_m = 0.7 \zeta \rho_w w^2 \quad (5)$$

где ζ — коэффициент местного сопротивления для однофазного потока.

Для исследования неустойчивости потока, вызванной гравитационным эффектом, важнейшим моментом модели является определение гравитационной составляющей. Определение данной составляющей осуществляется интегрированием выражения

$$dp_g = -(\rho_l(1 - \alpha) + \rho_g \alpha)g \sin \theta dL \quad (6)$$

где θ — угол наклона оси трубы относительно горизонтальной плоскости, g — модуль ускорения свободного падения.

Истинное объемное паросодержание связано с усредненной по сечению скоростью пара

$$\alpha = \frac{w_g}{v_g} \quad (7)$$

где w_g — приведенная скорость пара, определяемая как отношение объемного расхода газа к общей площади сечения трубы.

Усредненная скорость пара в восходящем потоке определяется на основании считающейся теоретически наиболее обоснованной «модели дрейфа» [13, 14]

$$v_g = C_0 w + v_d \quad (8)$$

где C_0 — параметр распределения, v_d — скорость дрейфа.

На основе анализа формул, используемых для определения скорости дрейфа [13], с учетом условий течения в трубопроводах пароводяной геотермальной смеси (большой диаметр труб, доминирование по объему газовой фазы) для скорости дрейфа в модели используется формула

$$v_d = 2.8(1 - M) \sin \theta (g\sigma(\rho_l - \rho_g)/\rho_l^2)^{0.25} \quad (9)$$

где M — число Маха, σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Параметр распределения определяется формулой

$$C_0 = 1 + k_1(1 + \sin \theta + \cos \theta) \quad (10)$$

где k_1 — коэффициент структуры для восходящего потока

$$k_1 = 0.05(1 - x)(1 - M)(1 - \rho_g/\rho_l) \quad (11)$$

где x — массовое расходное паросодержание.

Скорость дрейфа, определяющая локальную разность скоростей фаз, для нисходящего потока, согласно формуле (9) имеет отрицательное значение. При этом для малых приведенных скоростей формула (8) может давать нереальные значения. Учитывая это, для нисходящего потока используется аналогичная формула, но определяющая усредненную скорость воды

$$v_l = Kw - v_d \quad (12)$$

где K — аналог параметра распределения

$$K = 1 + k_2(1 + \sin \theta + \cos \theta) \quad (13)$$

где k_2 — коэффициент структуры нисходящего потока.

Коэффициент структуры нисходящего потока определяется с учетом равенства скоростей воды для восходящего и нисходящего потока в условиях горизонтального течения

$$k_2 = 0.5 \left(\frac{v_{l0}}{w} - 1 \right) \quad (14)$$

где v_{l0} — скорость воды, определяемая в рамках традиционной модели дрейфа на основе формулы (8) для горизонтального течения.

Истинное объемное паросодержание для нисходящего потока находится по формуле

$$\alpha = 1 - \frac{w_l}{v_l} \quad (15)$$

где w_l — приведенная скорость воды, определяемая как отношение объемного расхода воды к общей площади сечения трубы.

Критерий (2) и формулы (3)-(15) являются основой используемой математической модели, которая была реализована в простейшем варианте — все величины определялись для одной узловой точки и считались неизменными на всем расчетном интервале. Аналогичный подход использовался ранее при расчете трубопроводов на Мутновском и Паужетском месторождениях [15], что не вызвало существенных сложностей на практике: длинные трубопроводы разбивались на участки, в пределах которых данное упрощение приемлемо.

Предложенная модель была верифицирована путем сравнения с расчетом по программе MODEL [15] (в рекомендованных условиях ее применения для типовых условий Мутновского месторождения, где имелись надежные опытные данные, подтверждающие результаты расчетов), а также по натурным данным, полученным на находящемся в эксплуатации трубопроводе от скважины Гео-1 (Мутновское месторождение), имеющем максимальный перепад высот из всех действующих отечественных трубопроводов пароводяной смеси (перепад высот 110 м при длине 1050 м), для двух значений расходов (на 16.09.2011 г. и 11.09.2019 г.), причем в первом случае расход выходил за диапазон применимости программы MODEL. При расчете трубопровод разбивался на 7 равных участков по 150 м со своими перепадами высот, и изменение давления определялось последовательно от участка к участку. Общий расчетный перепад давления в первом случае составил 1.52 бар, во втором — 1.76 бар, что с учетом измеренных значений (1.5 бар и 1.8 бар, соответственно) и погрешности измерений (± 0.2 бар) представляется хорошим согласованием. В результате верификации установлено, что в рекомендованных условиях применения программы MODEL имеет место хорошее согласование результатов расчетов, а за рамками рекомендованных условий (существенный наклон трубопровода, низкие скорости потока) новая модель показывает значительно лучшие результаты.

Влияние наклона трубопровода

В предложенной модели рассчитывается индекс устойчивости, его отрицательное значение указывает на наличие условий для развития гравитационной неустойчивости. Влияние наклона изучалось на примере типовых условий Мутновского месторождения: энтальпия смеси 1200 кДж/кг, давление в узловой точке 7.5 бар. Расчеты

выполнялись для трубопровода длиной 100 м с внутренним диаметром 0.4 м. Результаты расчетов для различных углов наклона представлены на рис.1.

Рис. 1. Зависимость индекса устойчивости от расхода

Неустойчивость имеет место как в восходящих, так и в нисходящих потоках.

Для трубопроводов на Мутновском месторождении номинальный расход находится в пределах от 50 до 60 кг/с. Учитывая тенденцию к снижению расхода скважин со временем, риск возникновения неустойчивости будет увеличиваться, особенно в восходящих потоках с большим углом наклона, отрицательное значение индекса устойчивости в которых достигается при расходах, близких к указанному диапазону. Заметим, что на данном месторождении уже имеются трубопроводы, расходы в которых ниже номинальных. Расходы, при которых возникает неустойчивость в нисходящих потоках, существенно ниже характерных для практики значений — этот случай представляет больше теоретический, чем практический интерес.

Отрицательный индекс устойчивости в трубопроводе в целом указывает не только на возможность неустойчивого режима работы самого трубопровода, но и на возможность развития неустойчивости в системе скважина–трубопровод, что может вызвать самозадавливание скважины и невозможность ее эксплуатации [8]. Неустойчивость на отдельных участках трубопровода также имеет негативный эффект – формируется локальная неустойчивость [11], приводящая к возникновению пульсаций в трубопроводе. Как правило, подобные пульсации не препятствуют возможности эксплуатации, но могут существенно ее усложнить.

Развитие неустойчивости в восходящих и нисходящих потоках имеет существенное различие. Спонтанное увеличение расхода в восходящих потоках приводит к снижению плотности смеси, снижая силу тяжести, препятствующую движению, увеличивая суммарную силу, вызывающую движение. При этом увеличение расхода в нижней части способно вызвать лишь локальное снижение массы и не снижает массу смеси в трубе в целом – эффективное развитие неустойчивости возможно только от выхода из трубы ко входу.

При малых расходах в нисходящих потоках, скорость воды может превышать скорость пара. Спонтанное увеличение расхода в этом случае может приводить к увеличению плотности смеси, увеличивая силу тяжести и суммарную силу, вызывающую движение. При этом увеличение расхода на выходе из трубы не увеличит силу тяжести в трубе в целом, следовательно, процесс развития неустойчивости бу-

дет иным от входа к выходу. Такое развитие исключает возможность возникновения самозадавливания, являющегося наиболее опасным проявлением неустойчивости [8].

Угол наклона влияет на необходимую для обеспечения устойчивости течения минимальную скорость течения. Это влияние показано на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость минимальной скорости (по гомогенной модели), необходимой для обеспечения устойчивости течения, от угла наклона трубы: 1 — нисходящий поток, 2 — восходящий поток

Наибольшее значение скорости (20,7 м/с) соответствует восходящему потоку в вертикальной трубе.

Влияние специфики рельефа трассы

Предположительно, индекс устойчивости в реальных трубопроводах зависит не только от разности высот начальной и конечной точки, но и от особенности рельефа трассы. Для примера, на рис. 3 представлены возможные варианты рельефа трассы из точки А в точку В: 1) сначала по наклонному, затем по горизонтальному участку; 2) сначала по горизонтальному, затем по наклонному участку.

Рис. 3. Варианты рельефа трассы трубопровода от точки А до точки В с превышением H

Поскольку нисходящие потоки в части неустойчивости не представляют практический интерес, исследование влияние рельефа трассы на индекс устойчивости целесообразно провести только для трубопроводов с восходящим потоком. Причем для выяснения принципиального вопроса о таком влиянии на первом этапе достаточно ограничиться рассмотрением двух участков в соответствии с рис. 3. Исследование осуществлялось для трубопровода с внутренним диаметром 0,4 м и длиной 100 м, для типовых условий Мутновского месторождения (энтальпия смеси 1200 кДж/кг, давление 7,5 бар). Превышение конечной точки над начальной (H) принималось

10 м. Расчеты выполнялись для трех значений расходов: 50, 30 и 20 кг/с. Первое значение соответствует номинальным условиям для данного трубопровода, второе – рискованным (при расходах менее 42 кг/с на вертикальных участках восходящего потока, согласно рис. 1, имеет место неустойчивость), третье – очень рискованным. Результаты расчета индекса устойчивости по первому варианту (рис. 3) представлен на рис.4.

Рис. 4. Зависимость индекса устойчивости по варианту 1 (J_1) от длины наклонного участка (L_1)

Отличие индексов по первому и второму вариантам представлено на рис. 5.

Рис. 5. Зависимость отношения индексов устойчивости по варианту 1 (J_1) и варианту 2 (J_2) от длины наклонного участка (L_1)

Снижение индекса устойчивости является отрицательным моментом, указывающим на приближение условий для развития неустойчивости. Максимальные значения индекса имеют место при равномерном наклоне по всей длине (рис. 4). Это указывает на то, что при строительстве трубопроводов для транспортировки смеси целесообразно избегать наличия участков со значительными углами наклона восходящих потоков.

Минимальные значения индекса имеют место при вертикальном наклонном участке (рис. 4), при этом имеют место заметные расхождения в вариантах (рис. 5).

Отметим, что для вариантов с вертикальными участками общий индекс устойчивости становится отрицательным при расходах 17.54 (для первого) и 17.63 кг/с (для второго). Первый вариант в отношении устойчивости выглядит предпочтительнее – в нем работа может быть устойчивой при расходах, менее 17.63 кг/с, когда во втором варианте будет иметь место неустойчивость. Следовательно, если наличие вертикальных участков при строительстве трубопроводов неизбежно, лучше их иметь в начале трубопровода.

Отметим также, что индекс устойчивости в условиях равномерного наклона существенно отличается от значений, соответствующих скачкообразному подъему (при малой длине наклонного участка, рис. 4). Из этого следует, что при гидравлическом расчете трубопровода не рекомендуется вводить общий уклон без учета специфики рельефа трассы: участки со значительными углами наклона следует рассчитывать отдельно.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Список литература/References

- [1] Norbeck J.H., McClure M.W., Horne R.N., “Field observations at the Fenton Hill enhanced geothermal system test site support mixed-mechanism stimulation”, *Geothermics*, **74** (2018), 135–149.
- [2] Zhang J., Xie J., Liu X., “Numerical evaluation of heat extraction for EGS with tree-shaped wells”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **134** (2019), 296–310.
- [3] Renaud T., Verdin P., Falcone G., “Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **143** (2019).
- [4] Iry S., Rafee R., “Transient numerical simulation of the coaxial borehole heat exchanger with the different diameters ratio”, *Geothermics*, **77** (2019), 158–165.
- [5] Smith J.H., “Collection and transmission of geothermal fluids”, *Geothermal energy: review of research and development*, Earth sciences, UNESCO, Paris, 1973, 97–105.
- [6] Lee K.C., Jenks D.G., “Ohaaki geothermal steam transmission pipelines”, *Proceedings 11-th New Zealand Geothermal Workshop*, 1989, 25–30.
- [7] Rizaldy, Zarrouk S.J., “Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines”, *Proceedings 38-th New Zealand Geothermal Workshop*, 2016, 1–5.
- [8] Шулюпин А.Н., *Устойчивость режима работы пароводяной скважины*, ООО Амурпринт, Хабаровск, 2018, 136 с. [Shulyupin A.N., *Ustoychivost' rezhima raboty parovodyanoy skvazhiny*, ООО Amurprint, Khabarovsk, 2018, 136 pp.]
- [9] Ruspini L.C., Marcel C.P., “Two-phase flow instabilities: a review”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **71** (2014), 521–548.
- [10] Liu F., Yang Z., Zhang B., Li T., “Study on Ledinegg instability of two-phase boiling flow with bifurcation analysis and experimental verification”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **147** (2020).
- [11] Shulyupin A.N., “Steam-water flow instability in geothermal wells”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **105** (2017), 290–295.
- [12] Шулюпин А.Н., Чермошентцева А.А., “Семейство математических моделей Well-4 для расчета течений в пароводяных геотермальных скважинах”, *Математическое моделирование*, **28:7** (2016), 56–64. [Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., “The Collection of Mathematical Models of Well-4 for the Calculation of Flows in Steam-Water Geothermal Wells”, *Mathematical Models and Computer Simulations*, **9:1** (2017), 127–132].

- [13] Xu Y., Fang X., "Correlations of void fraction for two-phase refrigerant flow in pipes", *Applied Thermal Engineering*, 64 (2014), 242–251.
- [14] Dang Z., Yang Z., Yang X., Ishii M., "Experimental study on void fraction, pressure drop and flow regime analysis in a large ID piping system", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111 (2019), 31–41.
- [15] Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н., "Новые вызовы при освоении месторождений парогидротерм с транспортировкой пароводяной смеси", *Горный Информационно Аналитический Бюллетень*, 2019, № 2, 43–49. [Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N., "Novyye vyzovy pri osvoenii mestorozhdeniy parogidroterm s transportirovkoj parovodyanoy smesi", *Gornyy Informatsionno Analiticheskij Byulleten'*, 2019, № 2, 43–49].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Norbeck J.H., McClure M.W., Horne R.N. Field observations at the Fenton Hill enhanced geothermal system test site support mixed-mechanism stimulation // *Geothermics*. 2018. vol. 74. pp. 135–149.
- [2] Zhang J., Xie J., Liu X. Numerical evaluation of heat extraction for EGS with tree-shaped wells // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. vol. 134. pp. 296–310.
- [3] Renaud T., Verdin P., Falcone G. Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. vol. 143.
- [4] Iry S., Rafee R. Transient numerical simulation of the coaxial borehole heat exchanger with the different diameters ratio // *Geothermics*. 2019. vol. 77. pp. 158–165.
- [5] Smith J.H. Collection and transmission of geothermal fluids in: H. Christopher, H. Armstead (Eds.), *Geothermal energy: review of research and development*, Earth sciences, UNESCO, Paris. 1973. pp. 97–105.
- [6] Lee K.C., Jenks D.G. Ohaaki geothermal steam transmission pipelines // *Proceedings 11-th New Zealand Geothermal Workshop*. 1989. pp. 25–30.
- [7] Rizaldy, Zarrouk S.J. Pressure drop in large diameter geothermal two-phase pipelines // *Proceedings 38-th New Zealand Geothermal Workshop*. 2016. pp. 1–5.
- [8] Шулюпин А.Н. Устойчивость режима работы пароводяной скважины. Хабаровск: ООО "Амурпринт 2018. 136 с.
- [9] Ruspini L.C., Marcel C.P. Two-phase flow instabilities: a review // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. vol. 71. pp. 521–548.
- [10] Liu F., Yang Z., Zhang B., Li T. Study on Ledinegg instability of two-phase boiling flow with bifurcation analysis and experimental verification // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. vol. 147.
- [11] Shulyupin A.N. Steam-water flow instability in geothermal wells // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. vol. 105. pp. 290–295.
- [12] Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Семейство математических моделей Well-4 для расчета течений в пароводяных геотермальных скважинах // *Математическое моделирование*. 2016. vol. 28. no. 7. pp. 56–64. (Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A. The Collection of Mathematical Models of Well-4 for the Calculation of Flows in Steam-Water Geothermal Wells // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017. vol. 9. no. 1. pp. 127–132 transl. English).
- [13] Xu Y., Fang X. Correlations of void fraction for two-phase refrigerant flow in pipes // *Applied Thermal Engineering*. 2014. vol. 64. pp. 242–251.
- [14] Dang Z., Yang Z., Yang X., Ishii M. Experimental study on void fraction, pressure drop and flow regime analysis in a large ID piping system // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. vol. 111. pp. 31–41.
- [15] Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н. Новые вызовы при освоении месторождений парогидротерм с транспортировкой пароводяной смеси // *Горный Информационно Аналитический Бюллетень*. 2019. №. 2. С. 43–49.

MSC 74A15

Research Article

Influence geometry of the pipeline at the stability of steam-water flow during the exploitation of a geo-power station

A.N. Shulyupin¹, A.A. Chermoshentseva², N.N. Varlamova¹

¹ Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Turgeneva st., 51, Russia

² Kamchatka State technical university, 683003, Petropavlovsk-Kamchatsky, Klyuchevskaya st., 35, Russia

E-mail: ans741@mail.ru, allachermoshentseva@mail.ru, vnn-dvgups@mail.ru

Cases of flow instability caused by the influence of gravitational forces in pipelines of steam-water mixture in geothermal fields are investigated. A new mathematical model of the steam-water flow was developed by authors, taking into account the gravitational effect and satisfying new requirements in the development of geothermal deposits with two-phase heat carrier transportation. The influence of the pipeline incline at the gravitational stability of the flow is shown. Recommendations on hydraulic calculation and construction of steam-water mixture pipelines are given.

Key words: geothermal field, steam-water flow, mathematical model, gravitational instability, pipeline incline, trunk-line relief.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-143-153

Original article submitted: 08.07.2020

Revision submitted: 22.07.2020

For citation. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N. Influence geometry of the pipeline at the stability of steam-water flow during the exploitation of a geo-power station. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **32**: 3, 143-153. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-143-153

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

Acknowledgments. The authors are deeply grateful to the referee for a number of comments that contributed to the improvement of the article.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N., 2020

Funding. The reported study was funded by RFBR, project number 20-05-00161