DOI *10.18454/PMI.2016.4.551*

УДК 532.55:621.1.016

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ В ДОБЫЧНОЙ СКВАЖИНЕ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ПАРОГИДРОТЕРМ

А.Н.ШУЛЮПИН
Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Представлены теоретические основы для прогноза неустойчивости режима работы добычных скважин на месторождениях парогидротерм. Рассматриваемая тема приобретает актуальность в связи с новыми условиями развития геотермальной энергетики, которые требует бережного использования фонда скважин. Рассмотрен механизм неустойчивости: повышение расхода увеличивает обеспечивающую движение силу, что вызывает еще большее повышение расхода. Увеличение силы происходит за счет снижения гравитационной составляющей, противодействующей движению, в результате снижения плотности пароводяной смеси. Показано, что в связи со спецификой развития такой неустойчивости в геотермальной скважине реакция забойного давления на изменение расхода не может эффективно влиять на устойчивость, а реакция устьевого давления может быть стабилизирующим фактором. Отмечены принципиальные недостатки ранее принятых представлений об устойчивости течения в пароводяных скважинах. Условием устойчивого течения рекомендуется считать положительное значение производной внутреннего забойного давления, определяемого как сумма устьевого и внутреннего перепада давления, по расходу.

***Ключевые слова*:** пароводяное течение, устойчивость, геотермальная скважина, пласт.

***Как цитировать эту статью*:** Шулюпин А.Н. Неустойчивость течения в добычной скважине на месторождении парогидротерм // Записки Горного института. 2016. Т.220. С.551-555. DOI 10.18454/PMI.2016.4.551

Введение. Тепло Земли является одним из видов возобновляемых энергетических ресурсов, с которыми связывается решение мировой энергетической проблемы в будущем и стабильный рост объемов использования в настоящем [11, 14]. Современная геотермальная энергетика находится в состоянии перехода к бездотационному развитию [5]. Это обуславливает актуальность вопросов, связанных с повышением эффективности использования имеющихся технических ресурсов, включая фонд скважин, затраты на бурение которых составляют значительную долю в проектах.

В последние годы большое внимание стало уделяться вопросам стимулирования скважин, о чем свидетельствует появление множества публикаций на эту тему, таких как [10, 12, 16, 20] и т.д. Пока остается без должного внимания проблема устойчивости течения в пароводяных скважинах, являющихся основным поставщиком теплоносителя для геотермальных электростанций. Вместе с тем опытным путем найдены способы достижения устойчивой работы скважин, ранее считавшихся непригодными для эксплуатации [19]. Для совершенствования известных и создания новых способов необходимо изучение механизмов, обеспечивающих устойчивость течения в скважинах.

Теоретические представления об устойчивости течения в пароводяных скважинах изложены в работах В.А.Дрознина [1-3] и базируются на механизме обеспечения устойчивости, предложенном в работе В.М.Ентова [4]. Однако в [9] показано, что представления, допускающие возможность устойчивого течения с двумя различными расходами при одинаковых условиях на устье, имеют расхождения с практическими данными. Таким образом, необходимо создать теорию устойчивости пароводяного течения в геотермальной скважине, не противоречащую имеющимся опытным данным.

Теоретические основы устойчивого течения в пароводяной скважине. Для понимания процессов, приводящих к возникновению и развитию неустойчивости, рассмотрим движение некоторого элемента, находящегося в канале между сечениями, расположенными на расстоянии Δz друг от друга. Используя второй закон Ньютона для данного элемента, запишем уравнение движения в проекциях на ось z:

$$\frac{\partial j}{\partial t} = \frac{p_1}{\Delta z} - \frac{p_2}{\Delta z} - f_f - f_c - f_g , \qquad (1)$$

где j – удельный массовый расход; p_1 и p_2 – внешнее давление соответственно на нижнее и верхнее сечение элемента; f_f – отнесенная к объему сила внутреннего трения; f_c – отнесенная к объему сила инерции, связанная с конвективным ускорением; f_g – отнесенная к объему гравитационная сила.

Левая часть уравнения (1) характеризует нестационарную часть изменения импульса, правая часть выражает сумму сил, действующих на элемент. Если возмущение в виде увеличения импульса (или удельного массового расхода) увеличивает правую часть данного уравнения, то повышается суммарная сила, вызывающая увеличение импульса. Таким образом, увеличение импульса вызовет увеличение движущей силы, которая, в свою очередь, будет увеличивать импульс. Следовательно, такое возмущение нарушит устойчивость потока. Если увеличение расхода снижает суммарную силу,

DOI 10.18454/PMI.2016.4.551

что можно трактовать как увеличение сил, препятствующих увеличению импульса, то такое возмущение не будет иметь развития.

Формализуя описанный механизм, определим условие устойчивости как отрицательное значение частной производной правой части уравнения (1) по расходу. Выразив сумму сил $(f_f + f_c + f_g) = \Delta p_{int}/\Delta z$, где Δp_{int} – внутренний перепад давления (или сумма перепадов давления на трение, конвективное ускорение и гравитацию), запишем условие устойчивости

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{int}}}{\partial j} > \frac{\partial}{\partial j}\left(p_1 - p_2\right). \qquad (2)$$

Обычно скважина представляется вертикальной трубой, реже она имеет сложную геометрию с вертикальной верхней частью и наклонной нижней частью. Рассмотрим устойчивость для скважины в целом, когда длина рассматриваемого элемента Δz равна длине скважины. Тогда p_1 – давление на забое, p_2 – давление на устье, причем в (2) эти параметры считаются внешними, т.е. они определяются условиями течения в питающем скважину пласте и в системе транспортировки теплоносителя от устья. В реальных условиях правая часть условия (2) для всей скважины всегда меньше нуля. Нарушение условия (2) возможно при отрицательном значении левой части.

Была проанализирована зависимость внутреннего перепада давления от расхода для типичной добычной скважины Паужетского месторождения парогидротерм, Камчатка (рис.1). Внутренний перепад рассчитывался по модели WELL-4 [7]. На рисунке также показана зависимость от расхода для внешнего перепада ($\Delta p_{ext} = p_1 - p_2$) при постоянном p_2 и линейной зависимости p_1. При этом устьевое давление определяется давлением в магистральном трубопроводе и практически не зависит от расхода. Зависимость p_1 соответствует стационарному притоку из пласта (наклон линии и положение начальной точки соответствуют типичным для данного месторождения условиям). Рабочая точка находится на пересечении линий. Точка 2 соответствует, а точка 1 не соответствует условию (2).

Влияние силы трения и инерции за счет конвективного ускорения с увеличением расхода возрастает. С ростом расхода усиливается перемешивание фаз, что снижает отношение их средних скоростей и плотность смеси, понижается и сила тяжести. Экспериментально доказано, что при малых расходах средние скорости пара и воды могут иметь даже различные направления [17]. Следовательно, нарушение условия (2) может проявляться при малом влиянии трения и ускорения. В данном случае для проявления неустойчивости определяющей является гравитационная сила, а усиливающим фактором – фазовый переход при декомпрессии, дополнительно снижающий плотность смеси. Этот случай можно классифицировать как гравитационную неустойчивость.

Соотношение (2) совпадет с условием, относящимся к классу неустойчивости Лединегга [13, 18]. Однако рассматриваемое явление трудно отнести к указанному классу. Во-первых, традиционно неустойчивость Лединегга связана с особенностью трения и фазовым переходом, вызванным тепловым потоком на стенке канала [13]. В нашем случае ни трение, ни тепловой поток на стенке не являются определяющими факторами. Во-вторых, характерным признаком для неустойчивости Лединегга является N-образный вид зависимости внутреннего перепада от расхода [18]. В нашем случае эта зависимость имеет V-образный вид (рис.1). Общность формального выражения условий устойчивости отражает общность механизма развития неустойчивости: увеличение (или снижении) импульса приводит к увеличению (или снижению) силы, которая вызывает еще большее увеличение (или снижение) импульса, и т.д.

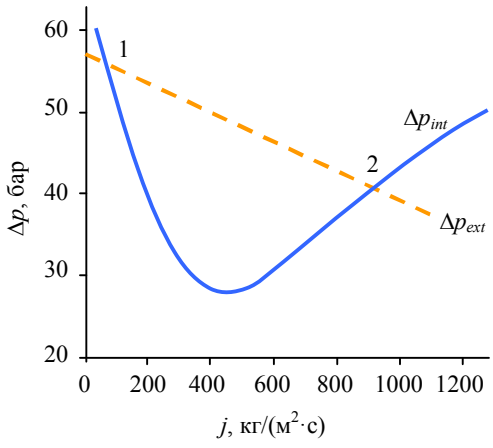


Рис.1. Зависимость внутреннего и внешнего перепадов давления от расхода для типовой скважины Паужетского месторождения парогидротерм

Учитывая, что правая часть соотношения (2) для геотермальной скважины всегда меньше нуля, достаточным условием устойчивости течения следует считать положительное значение левой части данного соотношения. Теоретически устойчивое течение возможно и при отрицательном значении левой части. Выполнение условия (2) за счет правой части требует достаточно быстрой внешней реакции забойного и устьевого давлений на изменение расхода, а это не всегда выполнимо.

Рассмотрим возможность сдерживания развития неустойчивости за счет реакции забойного давления. Флуктуации расхода, запускающие механизм неустойчивости, могут случаться как в крайних точках (устье и забой), так и внутри скважины. Ключевым фактором неустойчивости в нашем случае является снижение массы смеси, находящейся в скважине, при увеличении расхода. Флуктуации расхода на

DOI 10.18454/PMI.2016.4.551

некотором участке внутри скважины при постоянстве расхода на забое и его равенстве расходу на устье не изменят общей массы смеси в скважине. При наличии внутренней неустойчивости такие флуктуации формируют подобные описанным в работе [6] цуги, отличающиеся параметрами потока, которые препятствуют дальнейшему развитию неустойчивости. Но эти процессы не влияют на устойчивость течения в скважине в целом. Увеличение расхода на забое приведет к увеличению массы смеси в скважине. Только увеличение расхода на устье способно снизить общую массу смеси и запустить механизм гравитационной неустойчивости.

Флуктуации расхода на устье изменяют массу смеси в скважине. Появляются предпосылки для развития неустойчивости вверх по потоку (вниз скважины). Заметим, что скорость распространения возмущений в пароводяной среде существенно ниже аналогичной скорости не только в воде, но и в паре. Для того чтобы реакция забойного давления могла повлиять на развитие неустойчивости, возмущение от устья должно дойти до забоя. Глубина геотермальных скважин часто превосходит 2000 м. Существует интервал времени порядка десятков секунд, в котором развитие неустойчивости будет автомодельным относительно условий на забое. Таким образом, реакцию забойного давления на изменение расхода не следует рассматривать как фактор, способный обеспечить устойчивость течения.

Иная ситуация с устьевым давлением. В соответствии с рассмотренным механизмом, наличие барьера для развития неустойчивости в верхней части скважины способно обеспечить устойчивость течения. При этом необходимую быстроту реакции устьевого давления на изменение расхода технически несложно обеспечить, например, создавая гидравлические сопротивления в системе транспортировки смеси от скважины в непосредственной близости от устья. Следовательно, на практике условие устойчивости течения в пароводяной геотермальной скважине следует использовать в виде

$$\frac{\partial \Delta p_{\text{int}}}{\partial j} + \frac{\partial p_2}{\partial j} > 0 \,. \qquad (3)$$

Условие (3) не предполагает влияние на устойчивость производной забойного давления. При этом забойное давление определяется как характеристика внешней силы, т.е. оно определяется условиями в питающем пласте. Однако практически забойное давление можно определить и как внутренний параметр для скважины, оно является суммой устьевого и внутреннего перепада давления. В таком контексте в правой части условия (3) находится производная именно забойного давления, точнее внутреннего забойного давления. Следовательно, условие устойчивости можно определить как наличие положительного значения производной внутреннего забойного давления по расходу.

Обсуждение основ устойчивого течения в пароводяной скважине. Заметим, что используемый в настоящей работе подход, когда выполнение условия (2) считается необходимым (но недостаточным), противоречит доминирующим многие годы представлениям об устойчивости, развитым в работах В.М.Ентова [4] и В.А.Дрознина [3]. В частности, ранее считалось возможным устойчивое состояние, когда условие (2) не соблюдается, а именно, когда обе части отрицательны и модуль левой части больше модуля правой части (точка 1 на рис.1). Поводом к принятию этого решения послужило желание объяснить инверсию графиков производительности, выражающих зависимость расхода от устьевого давления.

Инверсия графиков производительности наблюдается не у всех скважин и не на всех месторождениях, поэтому не всеми принимается как достоверное явление. Например, у всех продуктивных скважин Мутновского месторождения (Камчатка, Россия) наблюдается монотонный рост расхода при снижении устьевого давления [8]. Как отмечено в [15], типичный график производительности не имеет инверсии. Однако явление инверсии все же существует. В 2013 г. автором были испытаны скважины Паужетского месторождения, снабжающие теплоносителем Паужетскую геотермальную электростанцию. Целью испытания было определение участка графика производительности в области рабочего устьевого давления. В дальнейшем эти данные использовались для оценки изменения расхода скважин в случае модификации системы транспортировки теплоносителя, т.е. не ставилась задача обнаружить инверсию. Тем не менее, в трех случаях, когда давление инверсии оказывалось близким к рабочему давлению, инверсия обнаруживалась. Графики производительности трех этих скважин представлены на рис.2. Возможно, другие скважины также имеют инверсию графиков произ-

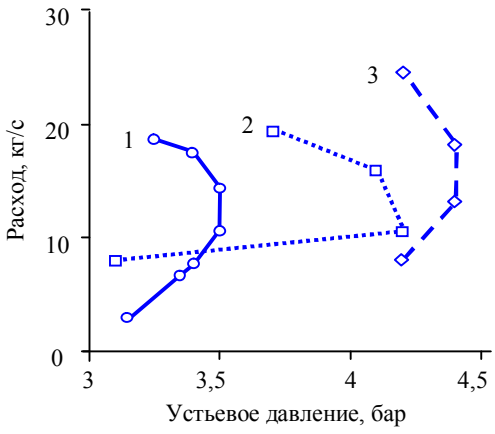


Рис.2. Графики производительности скважин Паужетского месторождения
1 – скв.108; 2 – скв.120; 3 – скв.123

DOI 10.18454/PMI.2016.4.551

водительности, но они не были испытаны при соответствующих устьевых давлениях и расходах. Заметим, что, вопреки ожиданиям, принципиальных изменений в характере колебаний расхода и давления вблизи точки инверсии не наблюдалось.

При инверсии одному значению устьевого давления могут соответствовать два значения расхода. Самым простым объяснением этого факта представляется допущение устойчивого течения как в точке 2, так и в точке 1 на рис. 1, используемое в теоретических представлениях В.М.Ентова и В.А.Дрознина. В их работах переоценивалась роль динамики забойного давления и совсем не учитывалась реакция устьевого давления. Как показано в [9], опираясь на эти представления, невозможно адекватно объяснить все особенности взаимосвязи устьевого давления и расхода. Однако учет реакции устьевого давления позволяет адекватно интерпретировать все типы графиков производительности, включая графики с инверсией, допуская лишь одно возможное значение расхода для заданных условий на устье, соответствующее точке 2 на рис.1. При одинаковом устьевом давлении и различных расходах условия должны отличаться зависимостью устьевого давления от расхода.

Если рассматривать устойчивость течения на локальных участках как возможность сохранения внешних давлений, то соответствующее условие будет формализовываться как положительное значение правой части (2), или в безразмерном виде

$$a > 0, \tag{4}$$

где a – безразмерный параметр внутренней устойчивости,

$$a = \frac{j}{(\partial p / \partial z)} \frac{\partial}{\partial j}\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right).$$

В реальных условиях выполнение условия (4) на всех участках скважины проблематично. Если начало кипения находится в пласте, то это условие нарушится на участке питания, где расход меняется от рабочего значения на верхней границе до нуля на нижней границе. В реальных скважинах протяженность участка питания составляет десятки метров, иногда превосходя сотню метров [7]. Если уровень начала кипения находится внутри скважины, то несоответствие этому условию возможно при малом паросодержании, когда влияние трения и конвективного ускорения мало.

Для примера рассмотрим распределение внутренней устойчивости по глубине типичной скважины Паужетского месторождения парогидротерм с типичными условиями питания, т.е. условия работы скважины соответствуют точке 2 на рис.1. Распределение параметра внутренней устойчивости по глубине скважины, рассчитанное по модели WELL-4, представлено на рис.3. Начало кипения располагается в скважине на глубине 434 м. Рисунок показывает, что в интервале глубины от 280 до 400 м параметр $a < 0$, т.е. течение имеет внутреннюю неустойчивость.

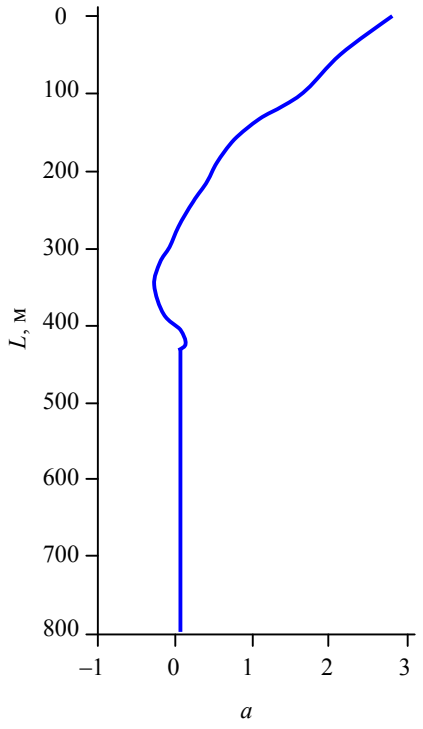


Рис.3. Распределение параметра внутренней устойчивости a по глубине L типичной скважины Паужетского месторождения

Для поддержания устойчивости течения в некотором элементе скважины, находящемся внутри указанного интервала, требуется соответствующая реакция внешнего давления на этот элемент. Причем задержка реакции должна быть меньше характерного времени развития неустойчивости. Но если рассматриваемый элемент окружен такими же неустойчивыми элементами, внутренняя неустойчивость в нем получит возможность для развития. Следовательно, в скважине всегда присутствует область, в которой имеются локальные условия для развития неустойчивости течения. В лучшем случае эта неустойчивость проявляется колебаниями параметров на устье, не препятствующими эксплуатации скважины. Такие колебания, считающиеся природным качеством пароводяной скважины, имеют значение для развития неустойчивости. Рассматриваемый тип неустойчивости развивается от устья к забою. Если на устье не будет условий для развития, неустойчивость не появится даже в случае несоответствия условию (3) для скважины в целом. Колебания параметров способствуют появлению необходимых условий на устье. В случае удовлетворения условия (3) для пароводяной геотермальной скважины в целом колебания не будут развиваться в общую неустойчивость течения.

DOI *10.18454/PMI.2016.4.551*

Заключение. Главным выводом настоящей работы является утверждение о том, что для пароводяной геотермальной скважины в целом (не на локальных участках) условием устойчивого течения следует считать положительное значение производной внутреннего забойного давления, определяемого как сумма устьевого и внутреннего перепада давления, по расходу, условие (3).

Благодарность. Автор благодарит В.А.Дрознина и И.И.Чернева за обсуждение вопросов устойчивости течения в пароводяных геотермальных скважинах.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дрознин В.А.* Гидродинамика пароводяных скважин // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С.262-265.

2. *Дрознин В.А.* О природе гейзерного режима // Гидротермальный процесс в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1971. С.96-103.

3. *Дрознин В.А.* Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.

4. *Ентов В.М.* О нестационарных процессах при фонтанировании скважин // Известия АН СССР. Сер. Механика и машиностроение. 1964. № 2. С.31-40.

5. *Колесников Д.В.* Проблемы эксплуатации ГеоЭС Камчатки / Д.В.Колесников, А.А.Любин, А.Н.Шулюпин // Электрические станции. 2015. № 4. С.16-19. DOI: 10.1007/s10749-015-0601-7.

6. *Озеров А.Ю.* Механизм базальтовых взрывов (Экспериментальное моделирование) // Вулканология и сейсмология. 2010. № 5. С. 3-19. DOI: 10.1134/S0742046310050015.

7. *Шулюпин А.Н.* Пароводяное течение в геотермальной скважине / А.Н.Шулюпин, А.А.Чермошенцева // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т.22. № 4. С.493-499. DOI: 10.1134/S0869864315040083.

8. *Шулюпин А.Н.* Специфика гидравлического расчета транспортировки пароводяного теплоносителя на геотермальных месторождениях // Вулканология и сейсмология. 2013. № 3. С.15-24. DOI: 10.1134/S0742046313030068.

9. *Шулюпин А.Н.* Устойчивость режима работы добычной скважины на месторождении парогидротерм // Записки Горного института. 2015. Т.215. С.57-64.

10. An overview of a high energy stimulation technique for geothermal applications / M.C.Grubelich, D.King, S.Knudsen, D.Blankenship, S.Bane, P.Venkatesh // Proceedings, World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia. N 31070. 6 p.

11. *Bertani R.* Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report // Geothermics. 2016. Vol.60. P.31-43. DOI: 10.1016/j.geothermics.2015.11.003.

12. Experimental thermal stimulation of the Rotokawa Andesite / P.Siratovich, J.Cole, M.Heap, M.Villeneuve, T.Reuschle, K.Swanson, B.Kennedy, D.Gravley, Y.Lavallee // Proceedings, World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia. N 22044. 6 p.

13. *Ledinegg M.* Instability in Flow during Natural and Forced Circulation // Die-Warme. 1938. Vol.61. N°48. P.891-898.

14. *Lund J.W.* Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review / J.W.Lund, T.L.Boyd // Geothermics. 2016. Vol.60. P.66-93. DOI: 10.1016/j.geothermics.2015.11.004.

15. *March A.* Modelling a geothermal steam fields to evaluate well capacities and assist operational decisions // Proceedings, World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia. N 25008. 9 p.

16. *On M.D.G.* Evaluation of hydraulic stimulation-induced permeability enhancement / M.D.G.On, R.P.Andrino // Proceedings, World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia. N 22094. 8 p.

17. *Pashkevich R.I.* Film condensation in a large diameter tube with upward steam flow / R.I.Pashkevich, P.V.Murativ // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol.81. P.804-810. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.001

18. *Ruspini L.C.* Two-phase flow instabilities: A review / L.C.Ruspini, C.P.Marcel, A.Clausse // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol.71. P.521-548. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.047.

19. *Shulyupin A.N.* Some methods for reducing of steam deficit at geothermal power plants exploitation: Experience of Kamchatka (Russia) / A.N.Shulyupin, I.I.Chernev // Geothermal Energy. 2015. Vol.3. N 23, p.1-11. DOI: 10.1186/s40517-015-0042-4.

20. Well Stimulation Techniques Applied at the Salak Geothermal Field / R.G.Pasikki, F.Libert, K.Yoshioka, R.Leonard // Proceedings of the World Geothermal Congress, 2010. Bali, Indonesia. N 2274. 11 p.

Автор **А.Н.Шулюпин,** *д-р техн. наук, заместитель директора, ans714@mail.ru* (*Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия*).

Статья принята к публикации 25.03.2016.