УДК 532.55:621.1.016

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА РАБОТЫ ДОБЫЧНОЙ СКВАЖИНЫ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ПАРОГИДРОТЕРМ

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

Рассматривается условие устойчивости на основе согласования индикаторных характеристик пропускной способности скважины и питающего пласта. Анализируются две гипотезы устойчивого состояния: с одним и двумя возможными сочетаниями характеристик. Показано, что учет сопротивлений между устьем и средой с постоянным давлением позволяет объяснить все особенности взаимосвязи устьевого давления и расхода пароводяных скважин на основе гипотезы с одним сочетанием (при расположении рабочей точки на восходящей ветви характеристики скважины). Дано объяснение эффекту дросселирования на устье, использовавшемуся при разработке Мутновского месторождения парогидротерм для стабилизации режима работы скважин.

Ключевые слова: месторождение парогидротерм, скважина, пароводяное течение, устойчивость, расход, забойное давление.

Использование глубинного тепла Земли для обеспечения теплоносителем электрических станций является устойчиво развивающимся направлением мировой энергетики [11]. На ранних этапах в развитии этого направления существенную роль играли субсидии различных фондов и программ. Рост установленной мощности геотермальных электростанций (ГеоЭС) сопровождается сокращением доли субсидий в реализации проектов. Современная геотермальная энергетика во многих регионах развивается в равноправной конкурентной среде. Более того, например, на Камчатке, геотермальная энергетика выдерживает конкуренцию с традиционной тепловой при дотационной поддержке последней [3].

Теплоноситель всех действующих ГеоЭС России и большинства стран мира добывается на месторождениях парогидротерм и выводится скважинами на поверхность в виде пароводяной смеси. Опыт показывает, что не все скважины могут быть использованы в качестве добычных: иногда их не удается побудить к работе или после некоторого периода работы скважина самозадавливается и ее повторный запуск требует проведения новых пусковых мероприятий, в некоторых случаях имеет место пульсационный режим работы. Учитывая новые условия конкуренции и высокую стоимость бурения, вопросы устойчивости течения, обеспечивающей нормальный режим эксплуатации, приобретают особую актуальность.

Важнейшей причиной возникновения неустойчивости, препятствующей нормальной эксплуатации, считается несоответствие между возможностями питания скважины и ее пропускной способностью [4]. Условие устойчивости определяется графическим методом. В качестве характеристики пропускной способности скважины используется зависимость давления на забое от расхода при постоянном давлении на устье, которую получают расчетным методом. На рис.1 представлена характеристика условной скважины, соответствующей средним параметрам добычных скважин Паужетского месторождения (диаметр 0,2 м, глубина 800 м, энтальпия смеси 800 кДж/кг) при давлении на устье 1 бар. Для расчета перепада давления от устья до забоя использовалась программа WELL-4 [9]. Левая (нисходящая) ветвь определяется доминированием гравитационной составляющей перепада давления в области двухфазного течения, уменьшающейся с ростом расхода. Правая (восходящая) ветвь характеризуется доминированием составляющих на трение и ускорение, увеличивающихся с ростом расхода.

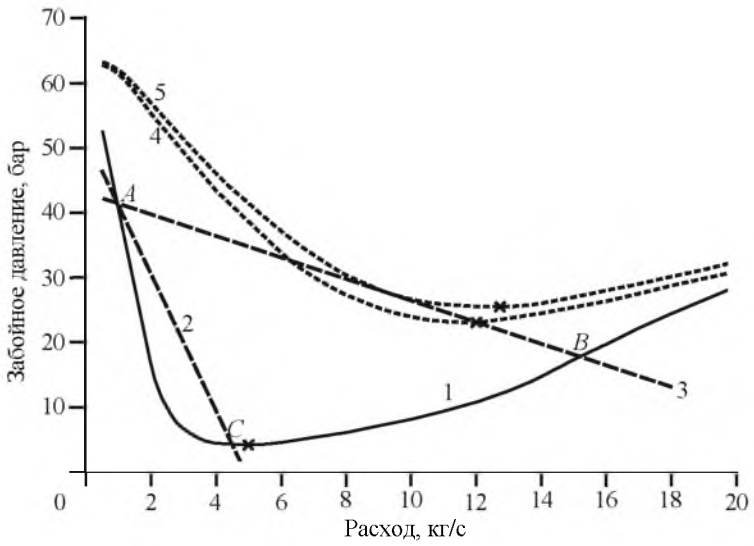


Рис.1. Взаимосвязь забойного давления и расхода
1 – характеристика скважины при устьевом давлении 1 бар; 2, 3 – варианты характеристики пласта; 4, 5 – характеристики скважины при устьевом давлении соответственно 2,5 и 2,7 бар. Точки экстремума помечены крестиком

В качестве характеристики питающего пласта также используется взаимосвязь давления на забое и расхода, определяемая для соответствующих условий фильтрации. Наиболее простым выражением является прямая, в динамике подземных вод соответствующая стационарному притоку при линейном законе фильтрации. Рабочая точка определяется пересечением характеристик скважины и пласта. На рис.1 для характеристики пласта используются два варианта прямых линий, отражающих различные сочетания углов наклона характеристик.

Существуют две гипотезы о возможном сочетании характеристик для устойчивой работы скважины. Одна допускает только один вариант сочетания характеристик (точка *B* на правой, восходящей, ветви характеристики скважины) [10]. Другая допускает два варианта (точка *A* на нисходящей ветви при большем угле наклона характеристики скважины и точка *B* на восходящей ветви) [1, 2], а неустойчивое состояние соответствует точке *C*.

Характеристики, изображенные на рис.1, определены для стационарных гидродинамических условий. Их использование для определения условий устойчивого течения можно считать оправданным. Но рассмотрение механизма развития неустойчивости, являющейся по определению нестационарным процессом, на основе характеристик представляется нецелесообразным. Оставив без внимания попытки теоретического обоснования таких механизмов, рассмотрим возможности интерпретации графиков производительности реальных пароводяных скважин.

График производительности выражает взаимосвязь устьевого давления и расхода и является основной характеристикой скважины, определяемой опытным путем. Измерения проводятся сразу после строительства скважины и периодически повторяются при эксплуатации. Измеряется расход на различных ступенях устьевого давления. Время ожидания стабилизации параметров на отдельной ступени может достигать нескольких суток.

Анализ данных по различным месторождениям позволяет выделить графики трех типов производительности. Первый характеризуется наличием одной ветви, отражающей снижение расхода с ростом устьевого давления (рис.2, кривая 1). В большинстве случаев в области максимального рабочего давления отмечается наличие пульсаций. Данный тип наиболее распространен [12], а на некоторых месторождениях, например на Мутновском, считается единственным [8].

Второй тип характеризуется наличием двух ветвей – левой (восходящей) при малых расходах и правой (нисходящей) при больших расходах (рис.2, кривая 2). Данному типу соответствовали три из четырех графиков, полученных в 2013 г. при испытании скважин Паужетского месторождения при участии автора. В этих испытаниях первая ступень устьевого давления соответствовала полному открытию рабочей устьевой задвижки. Затем задвижка плавно прикрывалась с короткими паузами (несколько минут) для контроля устьевого давления. При достижении существенного отличия устьевого давления от значения

на предыдущей ступени манипуляции с задвижкой прекращались, и после полной стабилизации устьевого давления (время ожидания составляло 1-2 ч, реальная стабилизация происходила в течение десятка минут) осуществлялись измерения на новой ступени. В процессе испытаний было отмечено, что переход между ветвями осуществляется без потери устойчивости, т.е. в области максимального рабочего давления изменений в интенсивности пульсаций не наблюдалось.

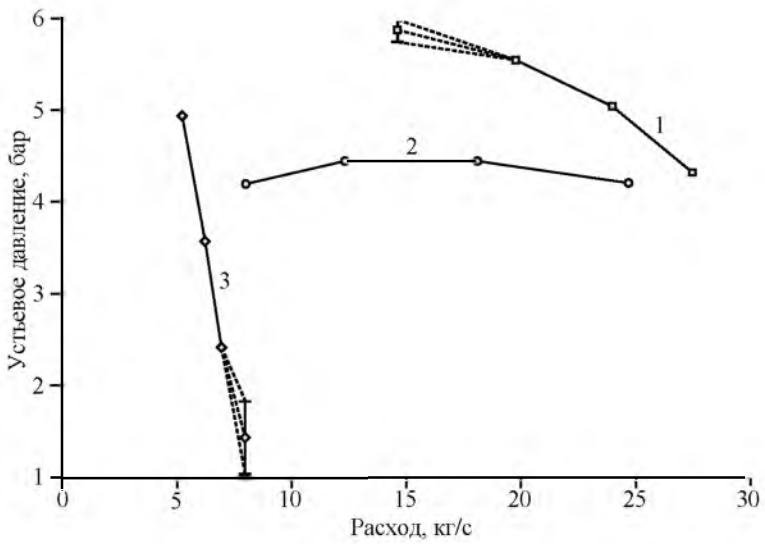


Рис.2. Типы графиков производительности пароводяных скважин на примере Паужетского месторождения

1 – первый тип, скважина 103, испытание 2013 г.; 2 – второй тип, скважина 123, испытание 2013 г.; 3 – третий тип, скважина 16, испытание 1961 г.

Третий тип характеризуется наличием неустойчивости при малых давлениях (рис.2, кривая 3). С ростом давления течение стабилизируется. Скважины этого типа встречаются редко, сведений по ним мало. Известно, что данный тип наблюдался при испытаниях ранних скважин Паужетского месторождения.

Гипотеза об устойчивом состоянии в точках *A* и *B* (см. рис.1) лежит в основе отечественной теории устойчивости режима работы пароводяных скважин [1]. Основным аргументом в ее пользу считается существование графиков производительности второго типа, в явном виде указывающего на наличие двух различных расходов при одном и том же устьевом давлении.

Однако данная гипотеза не полностью объясняет графики производительности второго типа. Рассмотрим переход от точки *B* к точке *A* на рис.1 при характеристике пласта 3. Сначала для движения в сторону снижения расхода необходимо увеличивать устьевое давление. Для рассматриваемой скважины расчетная характеристика при устьевом давлении 2,5 бар (кривая 4) пересечется с характеристикой пласта в точке экстремума. Дальнейшее повышение давления переведет скважину в неустойчивое состояние, когда угол наклона характеристики скважины меньше угла наклона характеристики пласта. И только при давлении 2,7 бар углы наклона характеристик совпадут (кривая 5). Дальнейшее снижение расхода будет осуществляться при уменьшении устьевого давления, т.е. в области левой ветви графика производительности. Но вблизи максимального рабочего давления на правой ветви графика производительности должна существовать область неустойчивого течения. В упомянутых измерениях 2013 г. на скважинах Паужетского месторождения этого не наблюдалось.

Рассматриваемая гипотеза отчасти объясняет графики производительности третьего типа: имея неустойчивое состояние (точка *C*, рис.1), при уменьшении расхода можно перейти в устойчивое состояние (точка *A*). Однако и в данном случае переход к устойчивому состоянию предполагает переход через максимальное рабочее давление, т.е. на левую ветвь графика производительности, имеющую место на графиках второго типа. Но на скважине, переведенной в устойчивое состояние и находящейся на левой ветви, должно наблюдаться снижение расхода при уменьшении устьевого давления, что не соответствует действительности (рис.2).

Первый тип графиков производительности объясняется наличием характеристики пласта, исключающей пересечение на левой ветви характеристики скважины (при большом

значении забойного давления, соответствующего нулевому расходу). Кроме того, испытание скважин обычно проводится в диапазоне давлений и расходов, представляющих интерес для эксплуатации, и область малых расходов может остаться без внимания. Поэтому для первого типа есть еще одно объяснение – это фактически второй тип с неохваченной испытаниями левой ветвью, а неустойчивость при высоких давлениях свидетельствует о вхождении в ранее упомянутую область неустойчивости при приближении к максимальному рабочему давлению.

На первый взгляд, наличие графиков производительности второго типа опровергает гипотезу об одном возможном сочетании характеристик пласта и скважины (точка *B*, рис.1). Ключевым моментом в данном случае является последовательность в трактовке постоянства устьевого давления, требуемого при построении характеристики скважины. Постоянство предполагает не только неизменность во времени, но и независимость от расхода. Иначе «постоянство» устьевого давления будет эквивалентно «переменности» забойного давления, задаваемого характеристикой пласта.

Обычно при испытаниях скважин средой с постоянным давлением является атмосфера. Но даже при свободном фонтанировании устьевое давление отличается от атмосферного, особенно при наличии критического режима истечения. В упомянутых испытаниях скважин Паужетского месторождения 2013 г. между устьем и атмосферой располагалась расходомерная установка, а изменение устьевого давления осуществлялось изменением степени дросселирования на рабочей устьевой задвижке. На Мутновском месторождении относительное постоянство давления обеспечивается в групповых станционных сепараторах, до которых пароводяная смесь проходит элементы устьевой обвязки и трубопровод, иногда длиной более 2 км [8]. Следовательно, постоянство давления практически реализуется не на устье.

Рассмотрим рабочую характеристику скважины с учетом дополнительного оборудования, установленного между устьем и средой с постоянным давлением на выходе из системы пласт – скважина – дополнительное оборудование. Дополнительное оборудование будем характеризовать суммарным коэффициентом местного сопротивления. Для расчета перепада давления дополнительного оборудования воспользуемся программой MODEL, предназначенной для гидравлических расчетов при транспортировке пароводяной смеси [8]. Для расчета перепада давления от устья до забоя воспользуемся программой WELL-4 [9]. Полученные характеристики при давлении на выходе 1 бар и суммарных коэффициентах местного сопротивления 0, 5, 10, 20, 40 и 100 (увеличение коэффициента можно интерпретировать поджатием рабочей устьевой задвижки) представлены на рис.3.

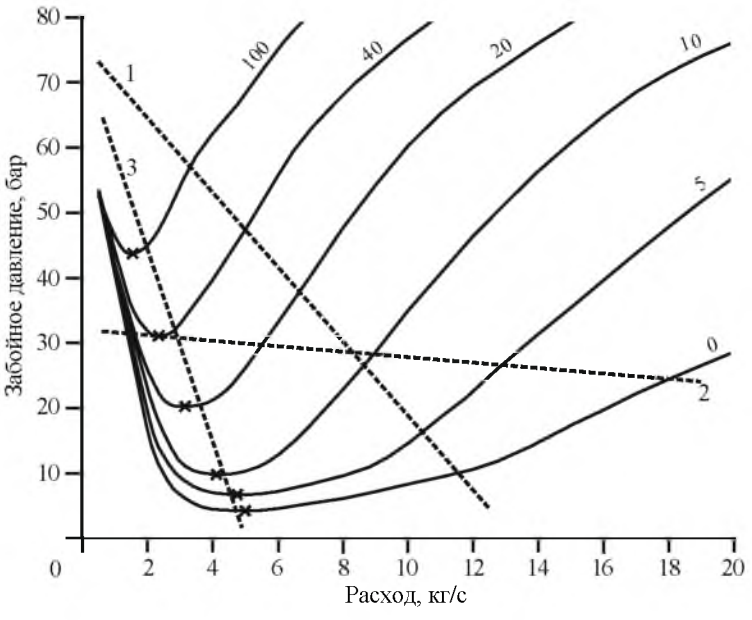


Рис.3. Характеристики скважины с учетом дополнительного сопротивления при коэффициентах 0-100 в сочетаниях с различными вариантами характеристики пласта (1, 2, 3), точки экстремума помечены крестиком

На рис.3 видно, что увеличение дополнительных сопротивлений смещает точки экстремума в сторону снижения

расхода. Для характеристики пласта с большим углом наклона (кривая 3) увеличение дополнительного сопротивления и, соответственно, устьевого давления при коэффициенте от 10 и выше стабилизирует работу системы, которая при коэффициентах 0 и 5 была неустойчивой. График производительности, построенный по рабочим точкам для различных характеристик (устьевое давление рассчитывалось по программе MODEL для соответствующих расходов и коэффициентов сопротивления), представлен на рис.4 кривой 1. Он демонстрирует третий тип графиков производительности, адекватно отражая взаимосвязь расхода и устьевого давления скважины, переводимой в стабильное состояние, увеличение устьевого давления приводит к снижению расхода.

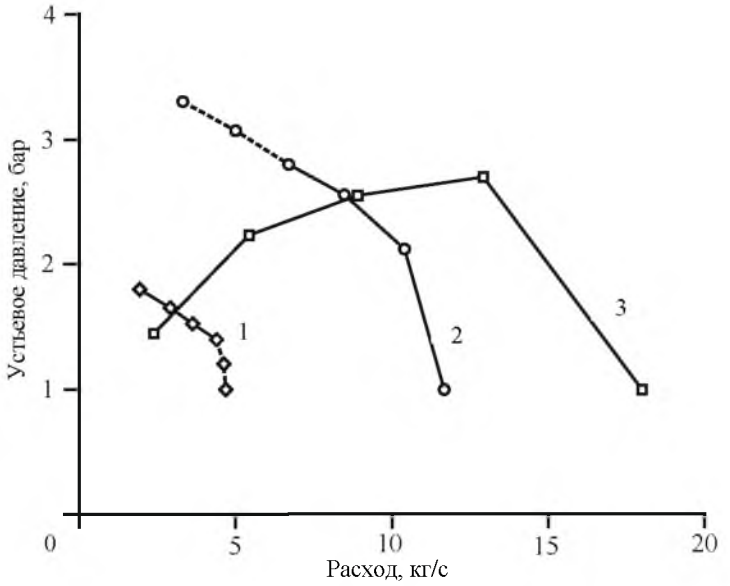


Рис.4. Расчетные графики производительности, соответствующие рабочим точкам на рис.3

1 – при характеристике пласта 3; 2 – при характеристике пласта 1; 3 – при характеристике пласта 2

Необходимо особо отметить случай нахождения рабочей точки вблизи экстремума. Вызывает сомнение, что развитие неустойчивости, протекающее в нестационарных условиях, однозначно определяется стационарными характеристиками. С большим основанием следует ожидать отсутствия принципиальных отличий в характере течения вблизи экстремума независимо от того, находится рабочая точка на восходящей или нисходящей ветви. Вблизи точки экстремума следует ожидать возникновения умеренной неустойчивости, усиливающейся с ростом угла наклона нисходящей ветви в рабочей точке.

График производительности, построенный для характеристики с малым углом наклона (кривая 2 на рис.3), представлен на рис.4 кривой 3. Этот график относится ко второму типу, причем нет предпосылок для появления неустойчивости при переходе через точку максимального давления, т.е. имеет место полное соответствие второму типу.

Решающим фактором, обеспечивающим устойчивую работу скважины на восходящей (левой) ветви графика производительности, является стабилизирующий эффект дополнительного сопротивления, а именно: его способность снижать перепад давления при снижении расхода. Даже в случае увеличения перепада давления в скважине при снижении расхода суммарный перепад давления с уменьшением расхода снижается, обеспечивая нахождение рабочей точки на восходящей ветви характеристики скважины.

График производительности характеристики пласта с промежуточным углом наклона (кривая 1 на рис.3) представлен на рис.4 кривой 2. Этот график следует отнести к первому типу. Программа MODEL, кроме определения перепадов давления, проверяет течение на наличие внутренней устойчивости. В частности, проверяется достаточность скорости транспортировки для предотвращения расслоения потока и образования жидких пробок [8]. Критерии, используемые в указанной программе, для двух точек с наименьшим расходом (рис.4) показали наличие неустойчивости. Следовательно, в рассмотренном случае увеличение коэффициента дополнительных сопротивлений от 40 и выше будет сопровождаться возникновением и развитием внутренней неустойчивости даже при скоростях в потоке, имеющих место на устье, тем более ниже устья, т.е. на всем протяжении пароводяного участка. Практически это будет выражаться умеренным развитием неустойчивости при

дальнейшем снижении скоростей в потоке. Это объясняет возникновение неустойчивости при высоких устьевых давлениях для скважин с графиками первого типа, а также может вызвать неустойчивость при малых расходах в скважинах с графиками производительности второго и третьего типов.

Еще одним фактором, ограничивающим рабочее давление, способно выступить смещение точки экстремума в сторону увеличения расхода в случае повышения давления на выходе, где реализуется относительное постоянство давления. Это смещение видно на рис.1: в процессе испытания скважины с характеристикой пласта 3 по технологии, обеспечивающей относительное постоянство давления на устье, при давлении выше 2,5 бар должна возникнуть неустойчивость.

Таким образом, учет сопротивлений между устьем и средой с постоянным давлением при построении характеристики скважины существенно меняет картину согласования характеристик скважины и пласта. Все особенности взаимосвязи устьевого давления и расхода описываются исходя из одного возможного сочетания – на правой, восходящей, ветви характеристики скважины. Это является аргументом в пользу истинности гипотезы с одним сочетанием характеристик.

Принятие этой гипотезы имеет важное практическое значение. Оно обосновывает некоторые технические решения, позволяющие перевести скважины в устойчивое состояние, ранее с долей риска внедренные инженерами-эксплуатационниками на основе опыта и интуиции. Научное обоснование способно внести уточнения, повышающие надежность и эффективность, в уже отработанные технологии.

Например, при эксплуатации Мутновского месторождения неустойчивость течения имела место в скважинах 4-Э, А-3 и А-2. Пароводяная смесь от указанных скважин поступает в групповой станционный сепаратор, скважины расположены недалеко от станции, трубопроводы пароводяной смеси имеют большой диаметр и создают минимальные гидравлические сопротивления, т.е. давление на устье практически определяется давлением в сепараторе. На скважинах 4-Э и А-3 простое дросселирование потока задвижкой на устье позволило стабилизировать течение, т.е. использовался стабилизирующий эффект дополнительного сопротивления, отмеченный при рассмотрении графиков производительности третьего типа.

Скважина А-2 имела невысокое максимальное рабочее давление, что не позволило применить дросселирование. Однако изменение конструкции самой скважины (установка внутри обсадной колонны вкладыша, уменьшающего диаметр скважины) позволило добиться устойчивой работы без дополнительного дросселирования [5]. Для иллюстрации эффекта уменьшения внутреннего диаметра на рис.5 под цифрой 2 представлена характеристика скважины с теми же расчетными параметрами, что и на рис.3, но диаметром 0,15 м, при устьевом давлении 1 бар. Сопоставляя данную характеристику с характеристикой скважины диаметром 0,2 м, можно сделать вывод, что уменьшение внутреннего диаметра смещает точку нулевой производной в сторону меньшего расхода. Если скважина диметром 0,2 м не может работать

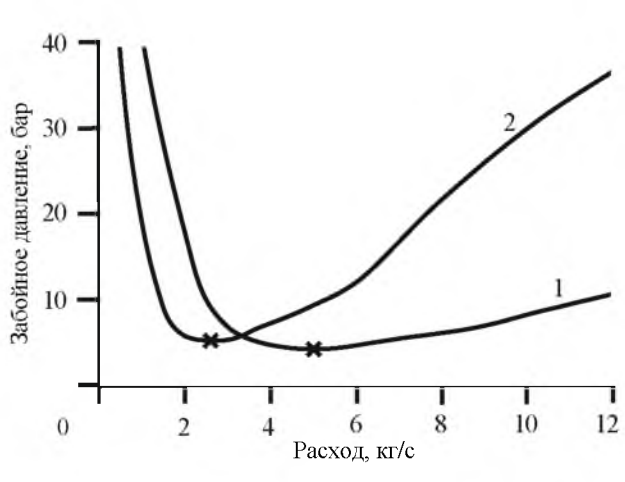


Рис.5. Характеристики скважины

1 – диаметр 0,2 м; 2 – диаметр 0,15 м, точки экстремума помечены крестиком

устойчиво с расходом менее 5 кг/с, то при диметре 0,15 м минимальный расход снижается до 2,7 кг/с, т.е. расширяется область устойчивых расходов.

Одним из способов снижения дефицита теплоносителя является увеличение расхода скважин путем снижения перепада давления при транспортировке теплоносителя от устья до ГеоЭС [6, 7]. Выявление стабилизирующей роли дополнительных сопротивлений требует введения ограничений на использование этого способа. После оценки возможного изменения расхода необходимо проверить новые значения расходных параметров на устойчивость. Если они не соответствуют восходящей ветви характеристики скважины, то проведение мероприятий по снижению гидравлических сопротивлений нецелесообразно, поскольку вместо приращения расхода можно получить неустойчивый режим работы скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дрознин В.А.* Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.
2. *Ентов В.М.* О нестационарных процессах при фонтанировании скважин // Известия АН СССР. Сер. Механика и машиностроение. 1964. № 2. С.31-40.
3. *Колесников Д.В.* Проблемы эксплуатации ГеоЭС Камчатки / Д.В.Колесников, А.А.Любин, А.Н.Шулюпин // Электрические станции. 2015. № 4. С.16-19.
4. Паужетские горячие воды на Камчатке / Под ред. Б.И.Пийпа. М.: Наука, 1965. 208 с.
5. *Чернев И.И.* Изменение конструкции как способ повышения производительности добычных скважин парогидротермальных месторождений / И.И.Чернев, А.Н.Шулюпин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. Отд. вып. 4. С.103-107.
6. *Шулюпин А.Н.* Проблемы разработки парогидротермальных месторождений Камчатки // Горный журнал. 2015. № 5. С.53-56.
7. *Шулюпин А.Н.* Оценка изменения расхода теплоносителя геотермальных электростанций при модификации системы его транспортировки / А.Н.Шулюпин, А.А.Любин, И.И.Чернев // Промышленная энергетика. 2014. № 10. С.39-42.
8. *Шулюпин А.Н.* Гидравлический расчет транспортировки пароводяного теплоносителя геотермальных электростанций / А.Н.Шулюпин, А.А.Чермошенцева // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. № 3/4. С.28-37.
9. *Шулюпин А.Н.* О расчете пароводяного течения в геотермальной скважине / А.Н.Шулюпин, А.А.Чермошенцева // Журнал технической физики. 2013. Т.83. № 8. С.14-19.
10. Экспериментальные исследования движения двухфазных систем в газовых скважинах / С.Н.Бузинов, С.А.Бородин, В.М.Пищухин и др. // Георесурсы. 2010. № 4(36). С.63-66.
11. *Bertani R.* Geothermal power generation in the World 2010–2014. Update report // Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. N 01001. 19 p.
12. *March A.* Modelling a geothermal steam fields to evaluate well capacities and assist operational decisions // Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. N 25008. 9 p.

REFERENCES

1. *Droznin V.A.* Fizicheskaya model' vulkanicheskogo protsessa (*A physical model of a volcanic process*). Moscow: Nauka, 1980, p.92.
2. *Entov V.M.* O nestacionarnyh processah pri fontanirovanii skvazhin (*On unsteady processes in well flowing*). Izvestiya AN SSSR. Ser. Mekhanika i mashinostroenie. 1964. N 2, p.31-40.
3. *Kolesnikov D.V., Lyubin A.A., Shulyupin A.N.* Problems with using the geothermal resources of Kamchatka. Power Technology and Engineering. 2015. Vol.49. N 3, p.212-215. DOI: 10.1007/s10749-015-0601-7.
4. Pauzhetskie goryachie vody na Kamchatke (*Pauzhetka hot waters in Kamchatka*). Editor B.I.Piipa. Moscow: Nauka, 1965, p.208.
5. *Chernev I.I., Shulyupin A.N.* Izmenenie konstrukcii kak sposob povyshenia proizvoditelnosti dobychnykh skvazhin parogidrotermalnykh mestorozhdeniy (*Redesign as a way of enhancing well yield in steam-hydrothermal deposits*). Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten. 2013. Otd. iss. 4, p.103-107.
6. *Shulyupin A.N.* Problemy razrabotki porogidrotermalnykh mestorozhdeniy Kamchatki (*Problems of developing steam hydrothermal fields in Kamchatka*). Gornyi zhurnal. 2015. N 5, p.53-57.
7. *Shulyupin A.N., Lyubin A.A., Chernev I.I.* Ocenka izmeneniya rashoda teplonositelya geotermalnyh elektrostanciy pri modifikacii sistemy ego transportirovki (*Assessment of changes in coolant flow at geothermal power plants attributed to the modification of a coolant transportation system*). Promyshlennaya energetika. 2014. N 10, p.39-42.
8. *Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A.* Gidravlicheskiy raschet transportirovki parovodyanogo teplonositelya geotermalnykh elektrostanciy (*Hydraulic calculation of geothermal power plant steam-water heat agent transportation*). Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2012.z N 3/4, p.28-37.

9. *Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A.* On calculation of steam-water flow in a geothermal well. Technical Physics. 2013. Vol.58. N 8, p.1100-1105. DOI: 10.1134/S1063784213080227.

10. *Buzinov S.N., Borodin S.A., Pishchukhin V.M., Kharitonov A.N., Nikolaev O.V., Shulepin C.A.* Eksperimentalnye issledovaniya dvizheniya dvuhfaznyh system v gazovyh skvazhinah (*Experimental investigation of two-phase systems in gas wells*). Georesursy. 2010. N 4(36), p.63-66.

11. *Bertani R.* Geothermal power generation in the World 2010-2014. Update report. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. N 01001, p.19.

12. *March A.* Modelling a geothermal steam fields to evaluate well capacities and assist operational decisions, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015. N 25008, p.9.

STABILITY OF PRODUCTIVE WELL OPERATION IN A STEAM HYDROTHERMAL FIELD

A.N.SHULYUPIN, *Dr. of Engineering Sciences, Deputy Director, ans714@mail.ru*
Mining Institute of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

A condition of well operation stability based on agreement of indicator characteristics of well and aquifer throughput capacity is considered. Two hypotheses of the stability state are examined: with one and two possible combinations of characteristics. It is shown that taking into account resistance between the wellhead and the environment with constant pressure helps explain all the features of wellhead pressure and flow-rate relationship of steam-water wells based on the hypothesis with one combination (when the operating point is located on the ascending branch of a well characteristic). The throttling effect on the wellhead which was used in the development of the Mutnovka steam hydrothermal field in order to stabilize the well operation is explained.

***Key words*:** steam hydrothermal field, well, steam-water flow, stability, flow-rate, bottomhole pressure.