УДК 532.5.014.4:532.529

А.Н. Шулюпин, А.А. Чермошенцева, А.В. Константинов

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРОБОВАНИЯ СКВАЖИН ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОД*

Аннотация. Рассмотрено влияние технологии опробования пароводяных скважин на получаемые графики производительности. Отмечены факты неустойчивой работы скважин Мутновского (Камчатка, Россия) месторождения парогидротерм в условиях эксплуатации при давлениях, соответствующих устойчивой работе в процессе опробования. Различие режимов работы скважины при одинаковом устьевом давлении объясняется различием условий вниз по потоку от устья. В условиях опробования стабилизирующий эффект оказывает реакция внешнего устьевого давления на изменение расхода. Эта реакция обусловлена гидравлическим сопротивлением измерительной установки и дросселированием на рабочей задвижке, с помощью которой устанавливается необходимая степень устьевого давления. Даны рекомендации по получению адекватной информации о перспективах использования скважин на основании результатов опробования. Предложено в полученных графиках производительности, при опробовании с дросселированием на устье, определять диапазон, отвечающий опробованию с постоянным давлением на устье, который определяет диапазон возможных давлений при эксплуатации. Обоснованы технические решения по обеспечению устойчивости режима работы скважин при эксплуатации. На основании теоретических данных и практического опыта отмечено, что уменьшение площади внутреннего сечения обсадной колонны является наиболее эффективным способом для обеспечения устойчивости режима работы скважины. Отмечена недопустимость при транспортировке теплоносителя от скважины создания условий, соответствующих отрицательному значению производной внешнего устьевого давления по расходу.

Ключевые слова: пароводяная скважина, опробование, график производительности, неустойчивость, устьевое давление.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-21-30

Введение

Освоение месторождений теплоэнергетических вод является одним из направлений использования возобновляемых энергетических ресурсов, с которыми связываются перспективы решения мировой энергетической проблемы, и характеризуется стабильным развитием [4, 8]. Достигнутые объемы использования теплоэнергетических вод уже не соответствуют представлению о дотационности данного направления. На современном этапе стали актуальными вопросы, связанные с повышением эффективности использования имеющегося фонда скважин, бурение которых составляет значительную часть затрат при реализации геотермальных проектов. Большое внимание уделяется стимулированию скважин [5, 10, 11, 13]. Исследуется возможность извлечения энергии без подъема геотермальных флюидов на поверхность

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

© А.Н. Шулюпин, А.А. Чермошенцева, А.В. Константинов. 2018.

[3, 6, 14], что позволяет эксплуатировать непродуктивные скважины.

При освоении высокопотенциальных месторождений теплоэнергетических вод, температура пластового флюида которых превышает 100 °С, нередко отмечались случаи неудачи при вводе в эксплуатацию скважин, опробование которых предполагало благоприятный исход. Так, например, на Мутновском месторождении (Камчатка) скважины А-2 и А-3, показавшие устойчивую работу при опробовании в диапазоне устьевых давлений 7,0—11,9 бар и 3,0—12,3 бар, соответственно, оказались неспособными к эксплуатации с устьевым давлением 7,0—7,5 бар.

Главная задача опробования скважин — определение зависимости расхода от устьевого давления, графическое представление которой называется графиком производительности. Результаты опробования служат основной информацией о возможностях последующей эксплуатации скважин и о месторождении в целом. Скважины высокопотенциального месторождения теплоэнергетических вод обычно выводят на поверхность теплоноситель в виде пароводяной смеси. В настоящей работе исследуется влияние технологии проведения опробования пароводяных скважин на получаемые графики производительности. Исследование направлено на выработку рекомендаций для получения адекватной информации об эксплуатационных возможностях скважин на основании результатов их опробования.

Методика расчета графиков производительности с учетом технологий опробования и измерения расхода

Факты, свидетельствующие о том, что скважина в одном случае при заданном давлении работает устойчиво, а в другом, при том же давлении, неустойчиво, указывают на существование дополнительных условий, обеспечивающих устойчивость режима работы. Как показано в [12], устойчивость течения в пароводяной скважине определяется условием:

$$\frac{\partial p_{\text{у}}}{\partial \text{G}} + \frac{\partial \Delta p_{\text{int}}}{\partial \text{G}} > 0\,, \qquad (1)$$

где G — массовый расход; Δp_{int} — внутренний перепад давления (сумма перепадов давления на трение, конвективное ускорение и гравитацию); $p_{\text{у}}$ — устьевое давление, определяемое как внешний параметр, зависящий от условий течения вне скважины.

Очевидно, что при равенстве устьевых давлений в процессе опробования и эксплуатации ожидается равенство расходов. Наличие в одном случае устойчивого, в другом неустойчивого течения объясняется различием значений первого члена правой части неравенства (1). Действительно, при эксплуатации скважина работает на коллектор, или магистральный трубопровод, или на групповой сепаратор. В указанном оборудовании поддерживается относительно постоянное давление, которое обеспечивает относительное постоянство устьевого давления, т.е. первый член правой части (1) близок к нулю. Опробование осуществляется на различных ступенях устьевого давления, которые обеспечиваются определенной степенью дросселирования потока на задвижке, расположенной перед входом в расходомерную установку. Т.е. вблизи устья скважины имеет место значительный перепад, обеспечивающий необходимую ступень устьевого давления, существенно зависящий от расхода. В этом случае величина первого члена правой части (1) значительна и имеет положительный знак, что повышает устойчивость. Это объясняет факт повышенной устойчивости режима работы скважины при опробовании.

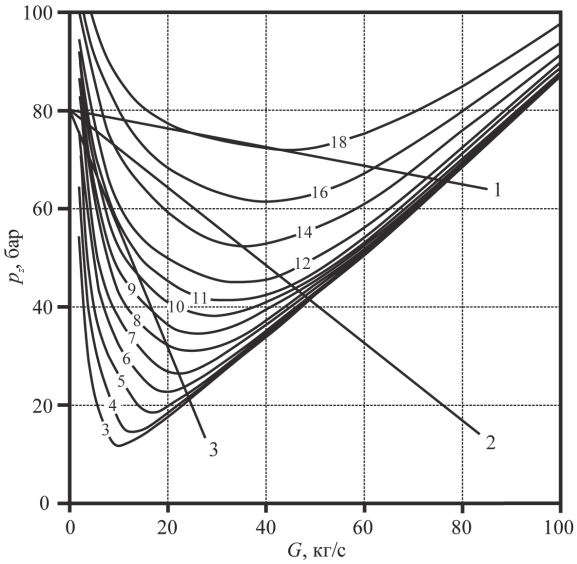

Рис. 1. Графики зависимости забойного давления от расхода для скважины при различных, независящих от расхода устьевых давлениях (от 3 до 18 бар) и для пласта, соответствующие высокой (1) средней (2) и низкой (3) производительности

Fig. 1. Graphs of the bottomhole pressure from the flow rate of high (1), average (2) and low (3) productivity at well for different, independent from flow rate of wellhead pressure (from 3 to 18 bar) and for reservoir

Рассмотрим данную особенность более подробно на примере типовой скважины Мутновского месторождения теплоэнергетических вод. Глубина скважины до верхней границы пласта составляет 1400 м, внутренней диаметр до глубины 1100 м составляет 0,225 м, ниже — 0,152 м. Энтальпия пластовой воды 1200 кДж/кг, статическое давление на верхней границе пласта 80 бар.

Принимая во внимание, что текущее давление в скважине на уровне верхней границы пласта (далее будет использоваться термин «забойное давление») складывается из устьевого давления и соответствующего перепада в скважине, правую часть можно определить как частную производную забойного давления по расходу. На рис. 1 представлены графики зависимости забойного давления от расхода, рассчитанные по модели WELL-4 [2] при постоянных устьевых давлениях. Условие устойчивости (1) соответствует положительному углу наклона данных графиков. В области высоких расходов графики, соответствующие низким устьевым давлениям, сливаются, что объясняется возникновением условий для критического потока на устье.

На рис. 1 также приведены характеристики пласта, соответствующие стационарному притоку при линейном законе фильтрации. Рабочие точки определяются пересечением характеристик скважины и пласта. Характеристика *1* проведена через точку экстремума для устьевого давления 18 бар. Скважина с данной характеристикой при среднем для эксплуатации устьевом давлении 8 бар будет соответствовать высокопроизводительным скважинам месторождения. Характеристика *2* проведена через точку экстремума для устьевого давления 14 бар. Скважина с данной характеристикой при среднем давлении 8 бар будет иметь среднюю производительность. Характеристика *3* проведена через точку экстремума для устьевого

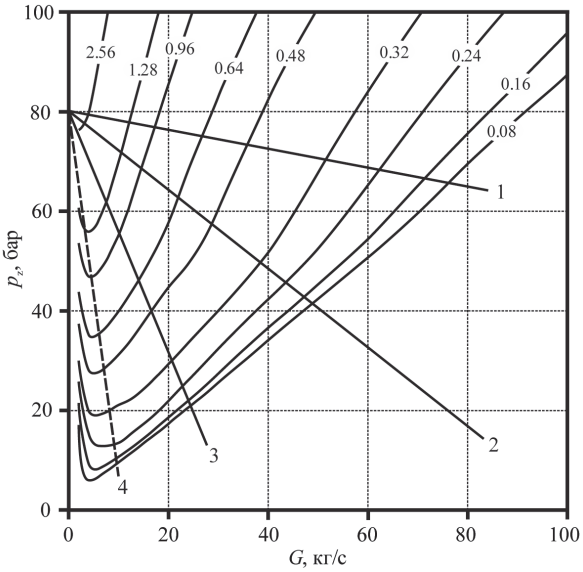

Рис. 2. Графики зависимости забойного давления от расхода для скважины при различных коэффициентах дросселирования (от 0,08 до 2,56) и для пласта, соответствующие высокой (1), средней (2), низкой (3) производительности и некондиционной скважине (4)

Fig. 2. Graphs of the bottomhole from the flow rate of high (1), average (2), low (3) productivity and substandard hole (4) for well at different coefficients of throttling (from 0,08 to 2,56) and for reservoir

давления 7 бар. Данная характеристика соответствует «проблемной» скважине с низкой производительностью — при постоянном устьевом давлении выше 7 бар скважина не будет иметь рабочих точек, т.е. работать не может. Заметим, что упомянутые скважины А-2 и А-3 по значению расходов при давлении 7 бар относятся к «проблемным».

При опробовании скважин Мутновского месторождения до 2004 г. расход измерялся по методу критического истечения с использованием так называемой «бочки Джеймса» [7], позже по методу сепарации с использованием установки С-100-0.5 [1]. В последнем случае сепарация осуществлялась при давлении, близком к атмосферному, а необходимая ступень устьевого давления обеспечивалась дросселированием на задвижке, установленной между устьем и сепаратором. Дросселирование происходило в режиме критического истечения, либо критическое истечение имело место непосредственно на устье (при открытой задвижке). Как показывают исследования, представленные в [1], при наличии критического потока расход и устьевое давление в первом приближении связаны линейно, т.е. устьевое давление можно определить как

$$p_y = p_{ext} + kaG\ , \qquad (2)$$

где p_{ext} — внешнее давление; k — коэффициент дросселирования, зависящий, в том числе, от площади сечения критического потока; a — переводной коэффициент (10^5 (мс)$^{-1}$).

Графики зависимости забойного давления от расхода, рассчитанные по модели WELL-4 с учетом зависимости устьевого давления от расхода, определяемой формулой (2) при внешнем давлении 10^5 Па, для различных коэффициентов дросселирования представлены на рис. 2. Там же приведены характеристики пласта, аналогичные рис. 1. Кроме того приведена характеристика пласта, про-

веденная через точку экстремума при коэффициенте дросселирования 0,96, соответствующая некондиционной скважине.

Графики производительности скважины, построенные по рабочим точкам (пересечение характеристик скважины и пласта на рис. 1 и 2) представлены на рис. 3. Графики для меняющегося и постоянного устьевого давления в области существования графиков для постоянного давления, естественно, совпадают (показаны сплошной линией), но графики для меняющегося давления имеют продолжение, показанное пунктирными линиями.

График высокопроизводительной скважины показан на рис. 3 под цифрой *1*. При опробовании с постоянным расходом график характеризуется монотонным снижением расхода при увеличении устьевого давления вплоть до 43,3 кг/с при 18 бар. При меньших расходах, а также при больших давлениях скважина работать не может.

Если опробование осуществляется с дросселированием, график имеет продолжение в область более высокого давления (до 18,2 бар при расходе 36 кг/с). Кроме того, наблюдается инверсия, характеризуемая переходом от увеличения к снижению расхода при снижении давления.

График скважины со средней производительностью показан на рис. 3 под цифрой *2*. При опробовании с постоянным расходом график монотонный. Минимальный расход 35 кг/с, максимальное устьевое давление 14 бар.

Если опробование осуществляется с дросселированием, график имеет продолжение в область более высокого давления (до 15,1 бар при расходе 20 кг/с). Также наблюдается инверсия.

График скважины с низкой производительностью показан на рис. 3 под цифрой *3*. При опробовании с постоянным расходом график монотонный. Минимальный расход — 22,2 кг/с, максимальное устьевое давление — 7 бар.

Если опробование осуществляется с дросселированием, график имеет продолжение в область более высокого давления (до 10,8 бар при расходе 10 кг/с).

График некондиционной скважины показан на рис. 3 под цифрой *4*. Гра-

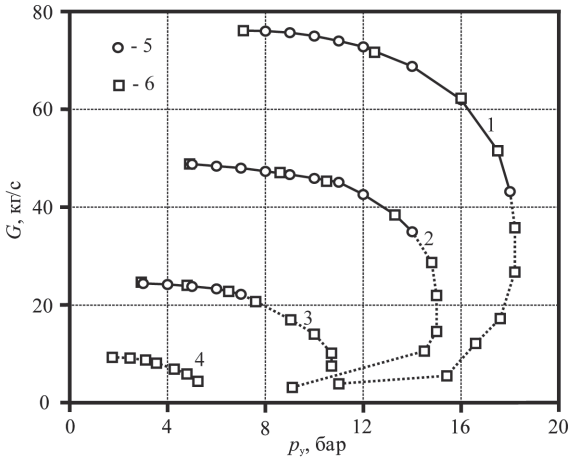

Рис. 3. Графики производительности скважины при соответствующих характеристиках пласта (1), (2), (3), (4), построенные по рабочим точкам рис. 1 (5) и рис. 2 (6)

Fig. 3. Productivity graphs of well at characteristics of reservoir (1), (2), (3), (4), set according to operating points Fig. 1 (5) and Fig. 2 (6)

фик построен только для опробования с дросселированием. График монотонный. Минимальный расход 4,4 кг/с (соответствует точке экстремума на рис. 2 при коэффициенте 0,96), максимальное устьевое давление 5,2 бар.

Обсуждение полученных результатов

Данные, отраженные на рис. 3, убеждают в том, что графики производительности, получаемые в ходе опробования скважин, зависят не только от характеристики пласта, но и от технологии проведения опробования. Дросселирование на устье является фактором, поддерживающим устойчивость течения в скважине, и обеспечивает более полное представление о производительности скважины. Однако, для принятия решения о практическом использовании скважины, когда она будет лишена стабилизирующего эффекта дросселирования, целесообразно ориентироваться на результаты, соответствующие испытанию с постоянным давлением на устье.

Опробование, проводимое как специальный вид работ, всегда проводится с дросселированием на устье. Теоретически, можно обеспечить проведение испытаний и при постоянном давлении, например, если использовать метод сепарации и ступень давления устанавливать дросселированием не до, а после сепаратора. Однако технически это сделать сложно, т.к. необходим большой объем сепаратора, причем работающего при высоком давлении. Проще, а с учетом проблем в обеспечении действительной независимости внешнего давления от расхода, возможно, и более точно, определение необходимых графиков осуществлять расчетным путем на основе испытания в условиях дросселирования. Для этого достаточно на основе измерений рассчитывать второй член левой части (1). Его отрицательное значение будет соответствовать точкам графика производительности, находящимся за пределами измерений при постоянном, не зависящем от расхода, устьевом давлении.

Отдельно следует отметить инверсию графиков производительности, обеспечиваемую стабилизирующим эффектом дросселирования. По ряду причин, факты наблюдения данного явления не столь известны. Во-первых, явление не вписывается в традиционное представление о графиках производительности, что не способствует акцентированию внимания на нем. Считается, что типичный график производительности пароводяной скважины не имеет инверсии [9]. Во-вторых, при большом угле наклона характеристики пласта инверсии может не быть даже при дросселировании. В-третьих, используемое при опробовании оборудование имеет ограниченный диапазон для измерения расхода. Поэтому область малых расходов, характерная для инверсии, но не представляющая практического интереса, часто не попадает в область измерений. В-четвертых, при малых расходах возможно самозадавливание скважин, что также затрудняет измерения в области инверсии. Тем не менее, явление инверсии следует считать эмпирически доказанным [12].

Как видно на рис. 1 и 2, при увеличении устьевого давления или коэффициента дросселирования точка экстремума на характеристиках скважин поднимается. Момент, когда эта точка достигает характеристики пласта, знаменует достижение минимального расхода, при котором возможна устойчивая работа скважины при соответствующих условиях опробования. Во многих пароводяных скважинах, в том числе во всех эксплуатационных скважинах крупнейших месторождений России (Мутновское и Паужетское на Камчатке), статический уровень воды располагается ниже устья.

При приближении к минимальному расходу скважина самозадавливается, т.е. прекращает работу. Однако, явление самозадавливания не следует объяснять только этим обстоятельством. Как показано в [12], в пароводяной скважине всегда присутствуют колебания параметров. И если в какой-то момент давление на устье снижается до внешнего давления, возможно развитие неустойчивости от устья к забою, приводящее к самозадавливанию.

Представленные результаты расчетов показывают, что дросселирование способствует увеличению верхнего предела давления на графике производительности. Например, рассмотренная скважина с низкой производительностью, имея при опробовании с дросселированием верхний предел 10,8 бар, при работе на объемный трубопровод и групповой сепаратор, т.е. с независимым от расхода внешним устьевым давлением, не сможет работать при давлении более 7 бар.

Полученные результаты обозначают технические решения для обеспечения устойчивости режима работы скважин в процессе эксплуатации. Первое, что следует отметить — это недопустимость транспортировки теплоносителя от скважины при условиях, соответствующих отрицательному значению производной устьевого давления в (1). При кажущейся невозможности нарушения данного требования следует признать это возможным. Например, при проектировании и строительстве некоторых трубопроводов для транспортировки пароводяной смеси от скважин до групповых станционных сепараторов на Мутновском месторождении были допущены ошибки в выборе диаметра [1]. В результате на восходящих участках трубопроводов сложились условия для возникновения рассмотренной в [12] гравитационной неустойчивости, что способно вызвать снижение перепада давления в трубопроводе при увеличении расхода, а это при постоянстве давления в сепараторе приводит к отрицательному значению производной устьевого давления.

В случае возникновения неустойчивости в работе скважины ее устранение возможно путем искусственного увеличение перепада давления в системе транспортировки от устья. Причем, как ранее было отмечено, важен не столько сам перепад, сколько увеличение производной устьевого давления. Как показано в [12], на практике положительные результаты достигались дросселированием потока на выходе из устья. При этом целесообразно обеспечивать дросселирование в режиме обычного, а не критического истечения. Дифференцируя (2), при критическом истечении имеем:

$$\frac{\partial p_{\text{у}}}{\partial \text{G}} = \frac{(p_{\text{у}} - p_{\text{ext}})}{\text{G}}. \qquad (3)$$

В обычном режиме дросселирования зависимость от расхода квадратичная. Если линейную зависимость (2) заменить квадратичной, в выражении для производной устьевого давления появится коэффициент 2, т.е. при прочих равных условиях стабилизирующий эффект обычного режима дросселирования в два раза выше.

Дросселирование на устье простой, но не самый эффективный способ обеспечения устойчивой работы скважины. Он применим только в некоторых случаях и даже в них не способен обеспечить надежность условий устойчивости. Высока вероятность возникновения неустойчивости в переходных режимах, когда меняется давление в сепараторах и трубопроводах.

Наиболее эффективным способом для обеспечения устойчивости режима работы скважины является уменьшение площади ее внутреннего сечения. Это коренным образом изменяет характеристику скважины, смещая точку экстремума на графике зависимости забой-

ного давления от расхода в область меньших расходов [12], что позволяет добиться пересечения с характеристиками пласта в области положительного значения производной забойного давления, т.е. устойчивого режима работы, даже для изначально некондиционных скважин.

Заключение

Основным результатом настоящей работы является обоснование необходимости учета при интерпретации графиков производительности, технологических собенностей опробования скважин высокопотенциальных месторождений теплоэнергетических вод. В частности, устойчивая работа скважины при заданном давлении в процессе опробования не гарантирует устойчивой работы при том же давлении в процессе эксплуатации. При проведении опробования с дросселированием на устье, в полученных графиках производительности целесообразно определить диапазон, отвечающий опробованию с постоянным давлением на устье, который определяет диапазон возможных давлений при эксплуатации.

Кроме того, по результатам работы можно сделать некоторые практически значимые выводы:

- при транспортировке теплоносителя от скважины недопустимо создание условий, соответствующих отрицательному значению производной устьевого давления в (1);
- при использовании дросселирования, как способа стабилизации режима работы скважины, целесообразно обеспечивать условия для обычного, а не критического потока;
- наиболее эффективным способом для обеспечения устойчивости режима работы скважины является уменьшение площади ее внутреннего сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шулюпин А. Н.* Вопросы гидравлики пароводяной смеси при освоении геотермальных месторождений. — Владивосток: Дальнаука, 2011. — 262 с.

2. *Шулюпин А. Н., Чермошенцева А. А.* Семейство математических моделей WELL-4 для расчета течений в пароводяных геотермальных скважинах // Математическое моделирование. — 2016. — Т. 28. — № 7. — С. 56—64.

3. *Alimonti C., Berardi D., Bocchetti D., Soldo E.* Coupling of energy conversion systems and wellbore heat exchanger in a depleted oil well // Geothermal Energy. 2016. Vol. 4, No. 11. P. 1—17.

4. *Bertani R.* Geothermal power generation in the world 2010—2014 update report // Geothermics. 2016. Vol. 60. P. 31—43.

5. *Grubelich M. C., King D., Knudsen S., Blankenship D., Bane S., Venkatesh P.* An overview of a high energy stimulation technique for geothermal applications // Proceedings of the World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 2015. No. 31070. P. 1—6.

6. *Holmberg H., Acuña J., Næss E., Sønju O. K.* Numerical model for nongrouted borehole heat exchanges, part 2 — Evaluation. // Geothermics. 2016. Vol. 59. P. 134—144.

7. *James R.* Factors controlling borehole performance // Geothermics. 1970. Vol 2. P. 1502—1515.

8. *Lund J. W., Boyd T. L.* Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review // Geothermics. 2016. Vol. 60. P. 66—93.

9. *March A.* Modelling a geothermal steam fields to evaluate well capacities and assist operational decisions / Proceedings of the World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 2015. No. 25008. P. 1—9.

10. *On M. D. G., Andrino R. P.* Evaluation of hydraulic stimulation-induced permeability enhancement / Proceedings of the World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 2015.No. 22094. P. 1—8.

11. *Pasikki R. G., Libert F., Yoshioka K., Leonard R.* Well stimulation techniques applied at the Salak geothermal field / Proceedings of the World Geothermal Congress. Bali, Indonesia, 2010. No. 2274. P. 1—11.

12. *Shulyupin A. N.* Steam-water flow instability in geothermal wells // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2017. — Vol. 105. — P. 290—295.
13. *Siratovich P., Cole J., Heap M., Villeneuve M., Reuschle T., Swanson K., Kennedy B., Gravley D., Lavallee Y.* Experimental thermal stimulation of the Rotokawa Andesite // Proceedings of the World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 2015. No. 22044. P. 1—6.
14. *Wołoszyn J., Gołas A.* Experimental verification and programming development of a new MDF borehole heat exchanger numerical model // Geothermics. 2016. Vol. 59. P. 67—76. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шулюпин Александр Николаевич[1] — доктор технических наук, заместитель директора по научной и инновационной работе, e-mail: ans714@mail.ru,
Чермошенцева Алла Анатольевна — кандидат технических наук, доцент,
Камчатский государственный технический университет,
Константинов Александр Викторович[1] — аспирант,
[1] Институт горного дела ДВО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 12, pp. 21–30.

Features of well assaying data interpretation at highly promising heat energy water reservoirs

Shulyupin A.N.[1], Doctor of Technical Sciences,
Deputy Director for Science and Innovation Work, e-mail: ans714@mail.ru,
Chermoshentseva A.A., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Kamchatka State Technical University, 683003, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,
Konstantinov A.V.[1], Graduate Student,
[1] Institute of Mining of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia.

Abstract. The influence of the technology of steam–water well assaying on the resultant well productivity curves is discussed. It is mentioned that in the Mutnovskoe hydrothermal field (Kamchatka, Russia), wells operate unstably under pressures determined as stable during assaying. The difference in operating efficiency of the wells under the same mouth pressure is explained by the change in the conditions downward from the mouth. During assaying, the change in the flow rate is stabilized under the response of the external pressure at the well mouth. This response is governed by hydraulic resistance of measuring equipment and by throttling of flow-regulating valve, which is used to set the required mouth pressure. The recommendations on acquiring adequate information about well productivity prospects based on assaying data are given. It is proposed to use the productivity curves obtained with throttling at the well mouth in order to determine a range of possible operating pressures to be conformable with the conditions of assaying at the constant mouth pressure. The engineering solutions on stable operation of wells are substantiated. Based on the theoretical and practical data, it is emphasized that the reduction in the internal section area of casing is the most efficient approach to maintain stable operation of wells. Furthermore, it is pointed at inadmissibility of conditions conformable with the negative value of the external mouth pressure derivative with respect to flow rate during transport of the heat-carrying agent from wells.
Key words: steam-and-water well, assaying, productivity curves, instability, mouth pressure.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-21-30

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financial supported by the Russian Foundation for Basic Research, research project No. 16-05-00398.

REFERENCES

1. Shulyupin A. N. *Voprosy gidravliki parovodyanoy smesi pri osvoenii geotermal'nykh mestorozhdeniy* [Questions of steam-and-water mix hydraulics in development of hydrothermal fields], Vladivostok, Dal'nauka, 2011, 262 p.
2. Shulyupin A. N., CHermoshentseva A. A. Semeystvo matematicheskikh modeley WELL-4 dlya rascheta techeniy v parovodyanykh geotermal'nykh skvazhinakh [Mathematical modeling family WELL-4 for computa-

tion of flows in water-and-steam hydrothermal wells]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2016, vol. 28, no 7, pp. 56—64. [In Russ].

3. Alimonti C., Berardi D., Bocchetti D., Soldo E. Coupling of energy conversion systems and wellbore heat exchanger in a depleted oil well. *Geothermal Energy*. 2016. Vol. 4, No. 11. P. 1—17.

4. Bertani R. Geothermal power generation in the world 2010—2014 update report. *Geothermics*. 2016. Vol. 60. P. 31—43.

5. Grubelich M.C., King D., Knudsen S., Blankenship D., Bane S., Venkatesh P. An overview of a high energy stimulation technique for geothermal applications. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 2015. No. 31070. P. 1—6.

6. Holmberg H., Acuña J., Næss E., Sønju O.K. Numerical model for nongrouted borehole heat exchanges, part 2 Evaluation. *Geothermics*. 2016. Vol. 59. P. 134—144.

7. James R. Factors controlling borehole performance. *Geothermics*. 1970. Vol 2. P. 1502—1515.

8. Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*. 2016. Vol. 60. P. 66—93.

9. March A. Modelling a geothermal steam fields to evaluate well capacities and assist operational decisions. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 2015. No. 25008. P. 1—9.

10. On M.D.G., Andrino R.P. Evaluation of hydraulic stimulation-induced permeability enhancement. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 2015.No. 22094. P. 1—8.

11. Pasikki R.G., Libert F., Yoshioka K., Leonard R. Well stimulation techniques applied at the Salak geothermal field. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 2010. No. 2274. P. 1—11.

12. Shulyupin A.N. Steam-water flow instability in geothermal wells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 105. P. 290—295.

13. Siratovich P., Cole J., Heap M., Villeneuve M., Reuschle T., Swanson K., Kennedy B., Gravley D., Lavallee Y. Experimental thermal stimulation of the Rotokawa Andesite. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 2015. No. 22044. P. 1—6.

14. Wołoszyn J., Gołas A. Experimental verification and programming development of a new MDF borehole heat exchanger numerical model. *Geothermics*. 2016. Vol. 59. P. 67—76.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ БРИКЕТИРОВАНИЯ УГЛЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

(2018, № 7, СВ 39, 12 с., DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-39-3-11)

Москаленко Татьяна Владимировна[1] — к.т.н., старший научный сотрудник,
Михеев Валерий Александрович[1] — к.т.н., зав. лабораторией,
Ворсина Елена Владимировна[1] — к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
[1] Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения РАН, e-mail: labkiy@mail.ru.

Для сохранения энергетических показателейи товарных качеств угля, а также для повышения функциональности и пригодности к использованию его мелких классов предложено внедрение брикетирования в Республике Саха (Якутия), которое можно осуществить как на местах его непосредственной добычи, так и в местах его потребления. Приведены два способа брикетирования, разработанные для углей Кировского и Кангаласского месторождений на основе местного связующего (торф и отходы полиэтилена), позволяющие получить брикеты с высокими прочностными характеристиками.

Ключевые слова: уголь, мелкие фракции, снабжение топливом, северный завоз, брикетирование, брикеты, связующие вещества, полиэтилен, торф.

DEVELOPMENT OF BRIQUETTING IN THE REPUBLIC SAKHA (YAKUTIA)

Moskalenko T.V.[1], Candidate of Technical Sciences, Senior Research,
Mikheev V.A.[1], Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory,
Vorsina E.V.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor Senior Research,
[1] Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677018, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: labkiy@mail.ru.

To preserve the energy performance and commodityqualities of coal, as well as to improve the functionality and usability of its small classes, the article proposes the introduction of briquetting in the Republic of Sakha (Yakutia), whichcan be carried out both at the places of its immediate production and at the places of itsconsumption. Two methods of briquetting have been developed, developed for the coals ofthe Kirov and Kangalassky deposits on the basis of a local binder (peat and polyethylenewaste), which make it possible to obtain briquettes with high strength characteristics.

Key words: coal, small fractions, fuel supply, northern delivery, briquetting, briquettes, binders, polyethylene, peat.