

Из рисунка 3 б) видно, что при движении судна на мелководье при переменной глубине по заданной траектории получается большой выброс от заданной траектории, что можно объяснить ухудшением управляемости судна на мелководье.

Исследование модели подтверждают известную из практики истину о том, что на мелководье при переменной глубине значительно ухудшается управляемость судна.

### **Библиографический список:**

1. Соболев Г. В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения: Учебник для вузов. Л.: Судостроение, 1976.
2. Асланов Г. К. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Исследование систем автоматического вождения судов по ведущему кабелю». Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адмирала Макарова, Ленинград, 1981. 124с.
3. Асланов Г.К., Абдуллаева З.М. Моделирование влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты при уравнениях гидродинамики судна // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки -2011. - №22. – С.54-58.
4. Асланов Г.К., Абдуллаева З.М. Математическая модель движения судна на мелководье // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки - 2012. - №27. – С.36-41.

**УДК 556.382**

*Акаев А.И., Ниналалов А.И.*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ**

*Akaev A.I., Ninalalov A.I.*

## **METHOD OF CALCULATING THE OPTIMAL HEAT EMISSION GEOTHERMAL WELLS**

*В работе дается упрощенная методика расчета оптимальных режимов фонтанной и насосной эксплуатации геотермальных скважин, уменьшающая солеотложение и коррозию при эксплуатации. Приводится сравнительная характеристика по количественной оценке теплоотдачи пласта для указанных способов эксплуатации при одинаковых давлениях на устье скважины. Задача решается графоаналитическим методом на основе баланса давлений в скважине с учетом термолифта.*

**Ключевые слова:** фонтанный и насосный способы эксплуатации геотермальной скважины, устье, забой, пласт, водозабор, восходящий поток жидкости, дебит термальных вод, тепловой поток, теплоотдача, термолифт, теплоотбор, давление, индикаторная линия, характеристическое балансовое уравнение, энергетический потенциал.

*This paper presents a simplified method of calculating the optimal regimes of the fountain and the pumping exploitation of geothermal wells, reducing scaling and corrosion during operation. Comparative characteristics to quantify the heat of formation for these methods of operation under the same pressure at the well-head. The problem is solved graphic-analytical method based on a balance of pressure in the well with the heat pump.*

**Key words:** fountain pump and method of operation of geothermal wells, the mouth, face, reservoir, water intake, upstream fluid flow rate of thermal water, heat flow, heat transfer, the heat pump, heatselection, pressure, indicator line, characteristic balance equation, energy potential.

Реализация требований Закона № 261 и Государственной программы РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» требует от организаций и учреждений государственных и муниципальных образований, предприятий промышленности, транспорта, сельского и жилищно-коммунального хозяйства, обеспечения снижения энергоемкости ВВП на 13,5% до 2020 года. Поэтому интерес к практическому использованию подземных глубоких термальных вод для теплоснабжения и горячего отопления объектов государственной, муниципальной и хозяйственной деятельности остается по-прежнему высоким.

Районами промышленного освоения геотермальных ресурсов останутся районы развития самоизлива вод: Предкавказье, отдельные участки и площади в пределах Равнинного Крыма, юга Западной Сибири, отдельные участки Сахалина.

Для добычи подземных вод в основном используются поисково-разведочные и термальные скважины. В случае нормального технического состояния также могут использоваться непродуктивные нефтегазовые скважины [1÷3]. Эксплуатируемые месторождения характеризуются высокими пластовыми давлениями, температурами и, как правило, значительной коррозионной агрессивностью флюида. При температуре 85°C и выше термальные воды характеризуются значительным солеотложением. Наличие в воде  $\Delta\text{Ca}^{2+}$  даже в небольшом количестве вызывает нестабильность системы и приводит к выпадению карбонатных осадков в виде  $\text{CaCO}_3$ . С возрастанием температуры нестабильность воды резко увеличивается. Причинами интенсивного солеотложения являются парциальное давление углекислоты и содержание  $\text{CO}_2$  в газовой сфере термальных вод [2]. Для предотвращения интенсивного солеотложения в скважине необходимо поддерживать режим противодавления. Поэтому проблема прогнозирования оптимальных режи-

мов теплоотбора и теплоотдачи при эксплуатации геотермальных скважин является актуальной и требует дальнейших теоретических и практических исследований.

Подъем жидкости обычно осуществляется фонтанным и насосным способами, выбор которых зависит от гидрогеологических и геотермальных параметров пласта, к числу которых относятся глубина залегания, эффективная мощность водоносного горизонта, пластовая температура и др. Фонтанный, сугубо экстенсивный, способ подъема жидкости позволяет без поддержания пластовых давлений, за счет самоизлива скважин, извлекать небольшую часть запасов термальных вод и тепла. Значительное число эксплуатируемых термоводозаборов разрабатывается фонтанным способом. Его существенными недостатками являются: ограниченность территорий, в пределах которых возможно применение этого способа и снижение дебита за счет уменьшения гидростатического давления на пласт при достижении динамического уровня воды в скважине до 150-300 м. Насосный способ эксплуатации технически сложен в реализации, однако позволяет создавать относительно крупные водозаборы. Применение погружных секционных насосов турбинного типа с электродвигателем, установленным на устье скважины, несмотря на удорожание теплоотбора, дает возможность получить максимальные дебиты термальных вод и достигнуть наибольший коэффициент извлечения тепла [1]. Кроме того, в этом случае можно обеспечить достаточное противодействие в системе "скважина-пласт" и предотвратить нарушения режима эксплуатации и отложения солей.

В работе предлагается упрощенная методика расчета оптимальных режимов фонтанной и насосной эксплуатации геотермальных скважин, уменьшающая солеотложение и коррозию при эксплуатации. Для указанных способов эксплуатации приводится сравнительная количественная оценка теплоотдачи пласта при одинаковых давлениях на устье скважины. В качестве критерия оптимизации режима эксплуатации геотермальной скважины принимается отбор максимальной тепловой энергии при сохранении равновесного состояния термальных вод в стволе и теплообменных аппаратах. Задача решается графоаналитическим методом на основе баланса давлений в скважине с учетом термолифта. Предлагаемый метод актуален в связи с потребностями разработки все более глубоких горизонтов, содержащих высокоминерализованные воды.

Фонтанный способ эксплуатации геотермальной скважины.

Составим балансовое уравнение давлений для эксплуатируемой фонтанной скважины. Самоизлив скважины происходит, когда запас пластовой энергии достаточен для преодоления гидростатического давления столба жидкости, противодействия на устье и давления, расходуемого на трение, связанное с движением жидкости по стволу скважины. Сопротивлением призабойной зоны пренебрегаем, т.е. считаем, что скважина совершенна по характеру и степени вскрытия. Для продуктивных объектов, оборудованных не специальным фильтром, а обсадной колонной с последующим цементи-

рованием и перфорацией, или невоскрытых на всю свою мощность, учитываем также потери давления в фильтровой зоне. В случае несовершенства скважины как по степени, так и по характеру вскрытия дополнительное динамическое понижение уровня определяется в соответствии с известными методами В.И. Щурова [4].

Общим условием для работы фонтанирующей скважины будет следующее равенство

$$P_3 = P_\Gamma - P_T - P_y, \quad (1)$$

где  $P_3$  - давление на забое скважины;  $P_\Gamma$ ,  $P_T$ ,  $P_y$ , - соответственно гидростатическое давление столба жидкости в скважине, потери давления на трение и противодействие на устье.

Полное изменение устьевого давления  $P_y$ , выраженное через напор жидкости, приведенный к пластовым условиям, определяется по зависимости (1). Потеря напора в водоподъемных трубах при движении жидкости от пласта до устья скважины возникает за счет преодоления разного рода сопротивлений: трения, местных сопротивлений, пульсации потока жидкости и т.д. Гидростатическое давление столба жидкости  $P_\Gamma$  и потери на трение  $P_T$  могут быть определены по формулам гидростатики и Дарси-Вейсбаха следующим образом [3÷5]:

$$P_\Gamma = g \int_0^L \rho dz; \quad P_T = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (2)$$

где  $\rho = \rho_{20}(1 - \alpha_T T)$  - плотность жидкости;  $\lambda = \frac{0,3164}{R_e^{0,25}}$  - коэффициент гидравлического сопротивления;  $R_e = VD/\nu$  - число Рейнольдса;  $T = T_c - 20^\circ C$  - температура жидкости на забое;  $T_c = \frac{1}{L} \int_0^L T(z) dz$  - средневзвешенная температура жидкости в скважине;  $T(z) = T_n - \frac{\Gamma \pi (z-L)^2}{Qc\rho R}$  - текущая температура жидкости в скважине;  $D$  - диаметр подъемных лифтовых труб;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического сопротивления;  $V$  - скорость восходящего потока жидкости;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\nu$  - кинематическая вязкость;  $L$  - длина колонны;  $z$  - осевая текущая координата;  $\alpha_T$  - коэффициент термического расширения жидкости;  $\rho_{20}$  - плотность жидкости при  $20^\circ C$ ;  $T_n$  - пластовая температура;  $Q$  - дебит скважины;  $c$  - объемная теплоемкость;  $\Gamma$  - геотермический градиент;  $R$  - суммарное тепловое сопротивление скважины.

Приток жидкости из пласта в скважину может быть определен по формулам, приведенным в работе [4]:

$$Q = K(P_n - P_3)^n \text{ или } P_3 = P_n - \sqrt[n]{Q/K}, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент продуктивности;  $n$  - коэффициент, показывающий характер фильтрации жидкости через пористую среду;  $P_n$  - пластовое давление. При совместной работе пласта и скважины устанавливается общее забойное давление, определяющее такой приток жидкости при данной глубине скважины, чтобы он мог преодолеть противодействие на устье. Приравняв (1) и (3), получим характеристическое балансовое разрешающее уравнение для решения поставленной задачи:

$$P_r - P_r - P_y = P_n - \sqrt[n]{Q/K}, \quad (4)$$

Фонтанирование возможно лишь в том случае, если энергия, приносимая на забой жидкостью, равна или больше энергии, необходимой для подъема этой жидкости на поверхность при условии, что фонтанный подъемник работает на оптимальном режиме, т.е. на режиме наибольшего к.п.д.

Величина тепловой энергии  $W$  на устье скважины, соответствующая оптимальному дебиту, определяется согласно [5]:

$$W = gcqT_y = gcqT_n - 2\pi L^2/R, \quad (5)$$

где  $T_y$ ,  $T_n$  - соответственно температура на устье и в пласте;  $q$  – часовой расход воды.

Высокие дебиты скважин в сочетании с пластовыми давлениями приводят к тому, что потери на гидравлическое трение при транспортировании на поверхность становятся сравнимыми с энергетическими возможностями пласта. Поэтому эффективным средством уменьшения гидравлических потерь является увеличение диаметра лифтовых подъемных труб [5].

Насосный способ эксплуатации геотермальной скважины.

Довольно часто на практике из-за длительной эксплуатации высокопотенциальных терм или интенсивного отбора жидкости пластовое давление падает до такой степени, что дальнейшая фонтанная эксплуатация скважины становится вообще невозможной. Кроме этого встречаются очень много месторождений с низким энергетическим потенциалом термальных вод, не обеспечивающим эксплуатацию скважин с противодействием на устье. В этих условиях бесперебойное обеспечение потребителей энергией возможно с применением механизированных способов эксплуатации скважин. Одним из мероприятий для повышения теплоотбора, является эксплуатация скважины через подъемники большого диаметра погружными высокопроизводительными электронасосами. Однако, увеличение диаметра труб не всегда

возможно из-за ограничений, вносимых размерами эксплуатационных колонн. В таком случае гидростатическое давление и потери на трение, входящие в балансовое уравнение (4), необходимо определять по следующим формулам:

$$P_T = g \int_0^{L-l} \rho dz ; \quad P_T = \lambda \frac{L-l}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (6)$$

где  $l$  - глубина погружения электронасоса.

Рассмотрим пример расчёта уравнения (4) графоаналитическим способом на примере скважины I–Т Грязнореченской площади при условии использования фонтанного и насосного способов подъема жидкости. Характеристика продуктивного пласта: интервал перфорации эксплуатационной колонны диаметром 168 мм в пределах 2608÷2680 м; коэффициент продуктив-

$\frac{KI}{\mu}$

ности пласта  $K=2000$  м<sup>3</sup>/Мпа·с; гидропроводность  $\mu = 3570$  д·см/сПз; проницаемость  $K = 120$  мд; плотность воды  $\rho_{20} = 1001$  кг/м<sup>3</sup>; минерализация – 3,1 г/л;  $\mu$  – динамическая вязкость, сПз. Результаты исследований скважины приведены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1** - Термогидродинамические показатели геотермальной скважины I–Т

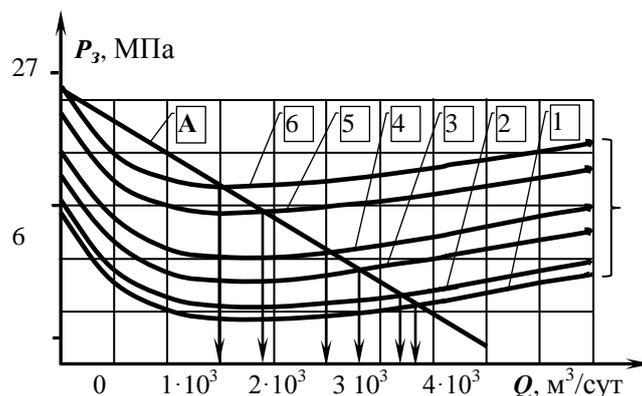
Диаметр штуцера, мм	Продолжит. работы, часы	Q, м <sup>3</sup> /сут	P <sub>y</sub> , Мпа	P <sub>з</sub> (L = 2650 м), Мпа				Температура	
				расчетное		по замеру глубин. манометра		T <sub>y</sub> , °С	T <sub>з</sub> , °С
				P <sub>з</sub>	ΔP	P <sub>з</sub>	ΔP		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Закр.	600	0	1,026	26,868	0	26,910	-	11	119
10	48	400	1,491	26,794	0,074	26,810	0,10	90	120
25	48	1150	1,094	26,367	0,601	26,350	0,560	101	120
50	36	1500	0,812	26,160	0,708	26,150	0,676	107	120

По данным исследований скважины на установившихся режимах (см. табл. 1 и табл. 2) строим график левой части уравнения (4), который представляет так называемую индикаторную линию и выражает зависимость забойного давления от дебита. Наложим на этот график семейство кривых правой части характеристического уравнения (4), построенного для выбранного диаметра лифтовых труб при различных устьевых давлениях. Точки пересечения семейства кривых с индикаторной линией определяют совместную устойчивую работу пласта и подъемника для различных значений устьевого давления.

**Таблица 2** - Изменение температуры терма по глубине геотермальной скважины I–Т

Глубина, м	Температура, °С	
	закрыта на 600 часов	Q = 1500 м <sup>3</sup> /сут
1	2	3
Устье	11	107
40	21	не замерялась
394	не замерялась	114
550	39	не замерялась
1000	не замерялась	117
1150	69	не замерялась
1300	80	не замерялась
1450	84	не замерялась
1675	94	не замерялась
2080	105	120
2300	114	не замерялась
2608	119	120
2650	120	120

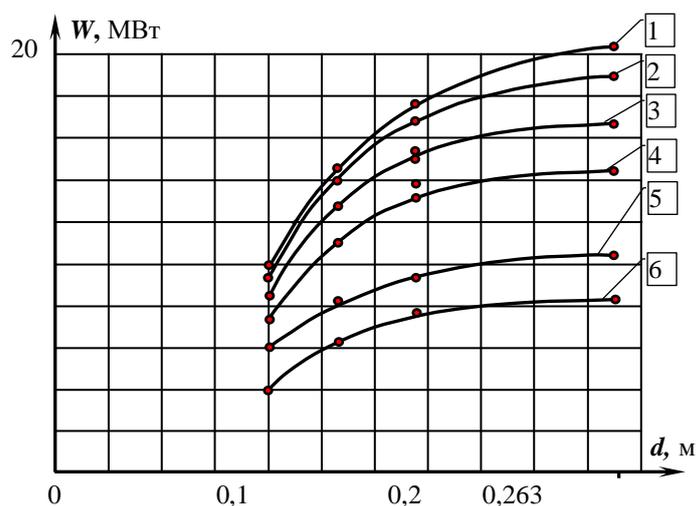
На рис. 1 приведены индикаторная линия А и семейства расчетных характеристик кривых В, построенные для подъемника диаметром 168 мм при различных устьевых давлениях  $P_y = 0,02; 0,1; 0,3; 0,5; 0,8$  и  $1,0$  МПа.



**Рисунок 1** - Индикаторная линия (А) и характеристические кривые (В) при диаметре лифтовых труб  $D = 168$  мм и устьевых давлениях  $P_y$  соответственно: 1 – 0,02; 2 – 0,1; 3 – 0,03; 4 – 0,5; 5 – 0,8; 6 – 1,0 МПа.

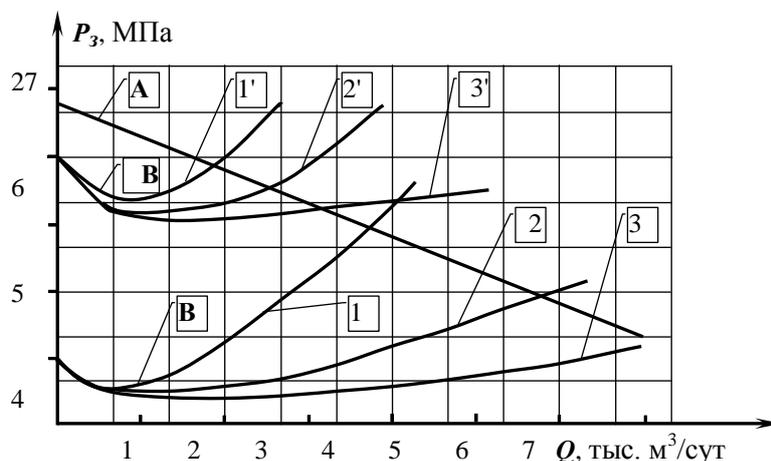
Как видно из рисунка 1 расчетные результаты хорошо согласуются с фактическими данными. Так, при забойном давлении 26 МПа и противодавлении на устье 0,8 МПа расчетный дебит составляет 1500 м<sup>3</sup>/сут., а фактическая производительность скважины при устьевом противодавлении 0,7 МПа составила 1650 м<sup>3</sup>/сут.

По формуле (5) выполнены, приведенные на рисунке 2, практические расчеты изменения тепловой энергии, получаемой на устье скважины, в зависимости от внутреннего диаметра лифтовых труб при различных давлениях на устье. Полученные результаты показывают ее пригодность для оценки тепловой энергии скважины при значениях дебита  $Q \geq 60$  м<sup>3</sup>/сут. Уравнение (5) позволяет прогнозировать количество тепловой энергии, получаемой на устье скважины в зависимости от диаметра подъемных труб. Для этого необходимо предварительно определить дебит скважины по графику на рисунке 1. Абсцисса точки пересечения индикаторной линии с характеристической кривой дает искомую величину  $Q$  для данного противодавления на устье. Анализ, представленных на рисунке 2, графиков показывает, что уменьшение диаметра лифтовых труб приводит к резкому уменьшению дебита и тепловой энергии, получаемой из скважины. Это объясняется следующим образом. С одной стороны, эксплуатация геотермальных скважин с применением насосно-компрессорных труб приводит к возрастанию скорости потока жидкости, что вызывает уменьшение потерь температуры восходящего потока и способствует сохранению тепловой энергии. С другой стороны, увеличение скорости восходящего потока из-за уменьшения диаметра подъемных труб приводит к резкому возрастанию потери давления на трение. В результате резко возрастает забойное давление, что приводит к уменьшению депрессии на пласт, а, следовательно, к уменьшению дебита скважины.



**Рисунок 2** - Графики зависимости тепловой энергии на устье скважины от диаметра лифтовых труб для различных значений устьевых давлений: 1 - 0,02 МПа; 2 - 0,1 МПа; 3 - 0,3 МПа; 4 - 0,5 МПа; 5 - 0,8 МПа; 6 - 1,0 МПа.

На рис.3 показаны совмещенные графики индикаторной линии А, характеристических кривых В', изображающих работу лифта фонтанным способом при  $P_y = 0,3$  МПа и аналогичных кривых В для насосного способа эксплуатации скважины.



**Рисунок 3** - Индикаторная линия (А) и характеристические кривые: (В') – при фонтанной эксплуатации для диаметров подъемных труб: 1 - 100 мм, 2 - 130 мм, 3 - 168 мм; (В) – при насосной эксплуатации.

Из рисунка 3 видно, что при эксплуатации скважины электронасосами, погруженными до глубины 300 м при диаметре листовых труб 100 мм расчетный дебит составляет 3750 м<sup>3</sup>/сут, в то время, когда дебит для фонтанного способа при этом же диаметре и противодавлении  $P_y = 0,3$  МПа составляет 1825 м<sup>3</sup>/сут. Таким образом, насосный способ эксплуатации позволяет увеличить дебит по сравнению с фонтанным способом в два раза. С увеличением диаметра лифтовых труб эта разница возрастет еще больше. Выигрыш тепловой энергии при насосном способе ещё более ощутим, из-за резкого увеличения скоростей и уменьшения потери пластовой температуры.

#### **Вывод:**

1. Повышение дебита за счет увеличения диаметра подъемных труб более выгодно, нежели достижение высокой устьевой температуры за счет повышения скоростей восходящего потока жидкости.
2. Насосный способ эксплуатации обеспечивает значительное расширение возможностей практического использования термальных вод и создания крупных водозаборов при существенном увеличении теплоотдачи пласта.
3. Для прогнозирования оптимальных величин отбора тепловой энергии при условии исключения солеотложения на поверхности технологического оборудования, рекомендуется использовать предлагаемые формулы (4) и (5).

#### **Библиографический список:**

1. Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод/Под ред. С.С. Бондаренко и Г.С. Вартамяна. М.: Недра, 1986.– 479 с.
2. Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане. М.: Наука, 1985.– 272 с.
3. Гаджиев А.Г., Курбанов М.К., Суетнов В.В. и др. Проблемы геотермальной энергетики. М.: Недра, 1980.– 208 с.

4. Щуров В.И. Технология и техника добычи нефти. М.: Недра, 1983.– 510 с.
5. Ниналалов А.И., Матаев Г.А., Малачиханов Т.Б. Прогнозирование теплоотдачи геотермальной скважины//термомеханика геотермальных систем. Сб. научн. тр. Махачкала: Даг. ФАН СССР, Инс-т проблем геотермии, 1990, С. 31-41.

**УДК 656.2.07**

*Баламирзоев А.Г., Баламирзоева Э.Р., Гаджиева А.М., Курбанов К.О.*

**ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ  
ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА РЕГИОНА**

*Balamirzoev A.G., Balamirzoeva E.R., Gadzhieva A.M., Kurbanov K.O.*

**TASK ALLOCATION AND DEVELOPMENT OF ENTERPRISES OF  
TRANSPORT COMPLEX OF THE REGION**

**(Статья аннулирована по причине недобросовестного заимствования)**