

УДК 620.92:621.651

Бугай Володимир Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та використання теплових вторинних енергоресурсів. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна. Вул. Сумська, 40, м. Харків, Україна, 61002. Тел. +38-057-700-16-40. E-mail: vl.bugai@gmail.com

ОЦІНКА ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНУ ПОТУЖНІСТЬ НАГНІТАЛЬНОГО НАСОСА

На основі методу малих відхилень запропоновано методика аналітичного дослідження впливу конструктивних параметрів геотермальної циркуляційної системи теплопостачання на електричну потужність нагнітального насоса.

Ключові слова: геотермальна циркуляційна система, нагнітальний насос, електрична потужність, метод малих відхилень.

Бугай Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и использования тепловых вторичных энергоресурсов. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина. Ул. Сумская, 40, г. Харьков, Украина, 61002. Тел. +38-057-700-16-40. E-mail: vl.bugai@gmail.com

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ МОЩНОСТЬ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО НАСОСА

На основе метода малых отклонений предложена методика аналитического исследования влияния конструктивных параметров геотермальной циркуляционной системы теплоснабжения на электрическую мощность нагнетательного насоса.

Ключевые слова: геотермальная циркуляционная система, нагнетательный насос, электрическая мощность, метод малых отклонений.

Bugai Volodymyr Serhiiiovych, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof. of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources. Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine. Str. Sumska, 40, Kharkiv, Ukraine. Tel. +38-057-700-16-40. E-mail: vl.bugai@gmail.com

EFFECT ASSESSMENT OF DESIGN PARAMETERS OF HEAT SUPPLY GEOTHERMAL CIRCULATION SYSTEM ON ELECTRIC POWER OF A FORCE PUMP

On basis of small deflection theory a method of analytical survey of design parameters effect of heat supply geothermal circulation system on electric power of a force pump is suggested.

Keywords: geothermal circulation system, force pump, electric power, small deflection theory.

Введение

Одна из задач технико-экономического обоснования использования теплоты недр для энергоснабжения, в том числе теплоснабжения, связана с определением капитальных и эксплуатационных затрат, определяющих себестоимость отпускаемого потребителю энергоносителя. Среди эксплуатационных затрат необходимо отметить долю затрат на электрическую энергию, поставляемую со стороны. При оптимальных вариантах разработки геотермального месторождения затраты на электроэнергию могут составлять от 5 до 50 % себестоимости тепловой энергии, а в некоторых случаях достигать 75–85 % [1–3].

Электрическая энергия в геотермальной циркуляционной системе, в основном, расходуется на работу нагнетательного насоса, обеспечивающего циркуляцию геотермального теплоносителя через скважины, породный массив (пласт), теплообменное и водоподготовительное оборудование. Электрическая мощность нагнетательного насоса зависит от расхода и температуры геотермальной жидкости, глубины, диаметров добычной и нагнетательной скважин, расстояния между ними, проницаемости пласта и других факторов. Следовательно, затраты на электроэнергию взаимосвязаны с технологическими и конструктивными параметрами геотермальной циркуляционной системы, которые, в свою очередь, определяют капиталовложения. Технико-экономической оптимизации

конструктивных и технологических параметров геотермальных циркуляционных систем посвящен ряд научных работ [1, 2, 4–7].

Цель и методы исследования

В данной работе ставится задача выполнить оценку влияния конструктивных параметров геотермальной циркуляционной системы теплоснабжения на электрическую мощность нагнетательно насоса, что важно на стадиях проектирования и технико-экономического обоснования. Для выполнения поставленной задачи используется метод малых отклонений [8, 9]. Выполнив линеаризацию уравнения, связывающего электрическую мощность нагнетательного насоса с конструктивными и другими параметрами геотермальной циркуляционной системы, можно получить зависимость изменения электрической мощности от изменения исходных влияющих параметров. Полученные коэффициенты влияния при переменных позволяют выполнить анализ изменения электрической мощности.

Результаты исследования

Рассмотрим простую геотермальную циркуляционную систему, состоящую из естественного пористого коллектора с движущимся в нем геотермальным теплоносителем, одной добычной и одной нагнетательной скважины, водоподготовительной установки, теплообменника системы теплоснабжения и нагнетательного насоса (рис. 1).

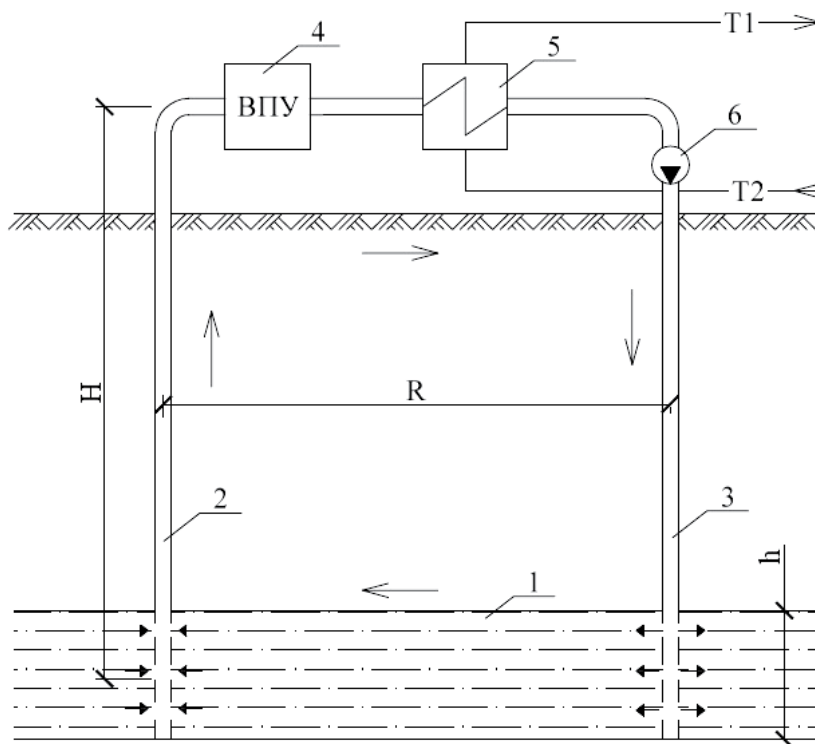


Рис. 1. Геотермальная циркуляционная система теплоснабжения: 1 – естественный пористый коллектор (пористая проницаемость горных пород); 2 – добычная скважина, 3 – нагнетательная скважина, 4 – водоподготовительная установка; 5 – теплообменник системы теплоснабжения; 6 – нагнетательный насос

Потери давления в геотермальном циркуляционном контуре, Па, можно определить по формуле:

$$\Delta P = \frac{8G^2}{\pi^2} \left[\frac{\lambda(H + \frac{R}{2})}{d_n^5 \rho_n} + \frac{\lambda(H + \frac{R}{2})}{d_o^5 \rho_o} \right] + \frac{G\mu}{2\pi kh\rho_n} \ln \frac{4R^2}{d_n d_o} + (\rho_o - \rho_n)gH + \Delta P_{н.об.}, \tag{1}$$

где G – расход геотермальной жидкости, кг/с;
 λ – коэффициент гидравлического трения;
 H – глубина скважины, м;
 d_n – диаметр нагнетательной скважины, м; d_d – диаметр добычной скважины, м;
 R – расстояние между скважинами, м;
 ρ_n – плотность геотермальной жидкости в нагнетательной скважине, кг/м³; ρ_d – плотность геотермальной жидкости в добычной скважине, кг/м³;
 μ – коэффициент динамической вязкости геотермальной жидкости, Па·с;
 k – проницаемость коллектора, м²;
 h – толщина пласта, м;
 $\Delta P_{н.об.}$ – потери давления в комплексе надземного оборудования, Па.
 Электрическая мощность нагнетательного насоса, кВт, определяется по формуле:

$$N = \frac{G\Delta P}{\eta_n \eta_d \rho_n 10^3}, \quad (2)$$

где η_n – КПД насоса; η_d – КПД двигателя насоса.

Конструктивными параметрами системы, определяющими потери давления, и, соответственно, электрическую мощность насоса, являются глубина добычной и нагнетательной скважин, расстояние между скважинами, диаметры добычной и нагнетательной скважин. Подставив формулу (1) в (2), рассмотрим электрическую мощность нагнетательного насоса N как функцию четырех переменных, которыми являются указанные выше конструктивные параметры:

$$N = \frac{G \left[\frac{8G^2}{\pi^2} \left[\frac{\lambda(H + \frac{R}{2})}{d_n^5 \rho_n} + \frac{\lambda(H + \frac{R}{2})}{d_d^5 \rho_d} \right] + \frac{G\mu}{2\pi k h \rho_n} \ln \frac{4R^2}{d_n d_d} + (\rho_d - \rho_n)gH + \Delta P_{н.об.} \right]}{\eta_n \eta_d \rho_n 10^3}. \quad (3)$$

Используя метод малых отклонений, проведем линеаризацию нелинейного уравнения (3). Полный дифференциал функции N запишем в виде

$$dN = \frac{\partial N}{\partial H} dH + \frac{\partial N}{\partial R} dR + \frac{\partial N}{\partial d_d} dd_d + \frac{\partial N}{\partial d_n} dd_n. \quad (4)$$

Учитывая сложность уравнения (3), частные производные можно найти с помощью математических программных пакетов, например, MathCAD. Далее результаты нахождения частных производных функции (3) не приводятся. Согласно используемому методу уравнение (4) можно приближенно считать полным приращением ΔN , т. е.

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial N}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial N}{\partial d_d} \Delta d_d + \frac{\partial N}{\partial d_n} \Delta d_n. \quad (5)$$

Далее запишем уравнение (5) в относительных отклонениях:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{N} \left(H \frac{\partial N}{\partial H} \frac{\Delta H}{H} + R \frac{\partial N}{\partial R} \frac{\Delta R}{R} + d_d \frac{\partial N}{\partial d_d} \frac{\Delta d_d}{d_d} + d_n \frac{\partial N}{\partial d_n} \frac{\Delta d_n}{d_n} \right) \quad (6)$$

или

$$\delta N = \frac{1}{N} \left(H \frac{\partial N}{\partial H} \delta H + R \frac{\partial N}{\partial R} \delta R + d_d \frac{\partial N}{\partial d_d} \delta d_d + d_n \frac{\partial N}{\partial d_n} \delta d_n \right). \quad (7)$$

Приняв обозначения для коэффициентов при переменных, уравнение (7) будет иметь вид:

$$\delta N = C_1 \delta H + C_2 \delta R + C_3 \delta d_o + C_4 \delta d_n. \quad (8)$$

Коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 находятся для определенного варианта геотермальной циркуляционной системы при заданном режиме работы.

Рассмотрим геотермальную циркуляционную систему теплоснабжения, схема которой соответствует рис. 1 при следующих исходных данных: $G = 10$ кг/с; $\lambda = 0,02$; $H = 1830$ м; $d_n = 0,176$ м, $d_o = 0,176$ м; $R = 400$ м; $\rho_n = 1025$ кг/м³; $\rho_d = 1017$ кг/м³; $k = 0,02 \cdot 10^{-12}$ м²; $h = 50$ м. Данный вариант рассмотрим как базовый, для которого определим коэффициенты при переменных в уравнении (8).

Получим, что

$$C_1 = -0,012, C_2 = 0,12, C_3 = -0,065, C_4 = -0,065.$$

Следовательно, зависимость электрической мощности нагнетательного насоса от конструктивных параметров геотермальной циркуляционной системы при указанных исходных данных определяется следующим уравнением в малых отклонениях (относительных):

$$\delta N = -0,012 \delta H + 0,12 \delta R - 0,065 \delta d_o - 0,065 \delta d_n. \quad (9)$$

Графическое представление уравнения (9) изображено на рис. 2.

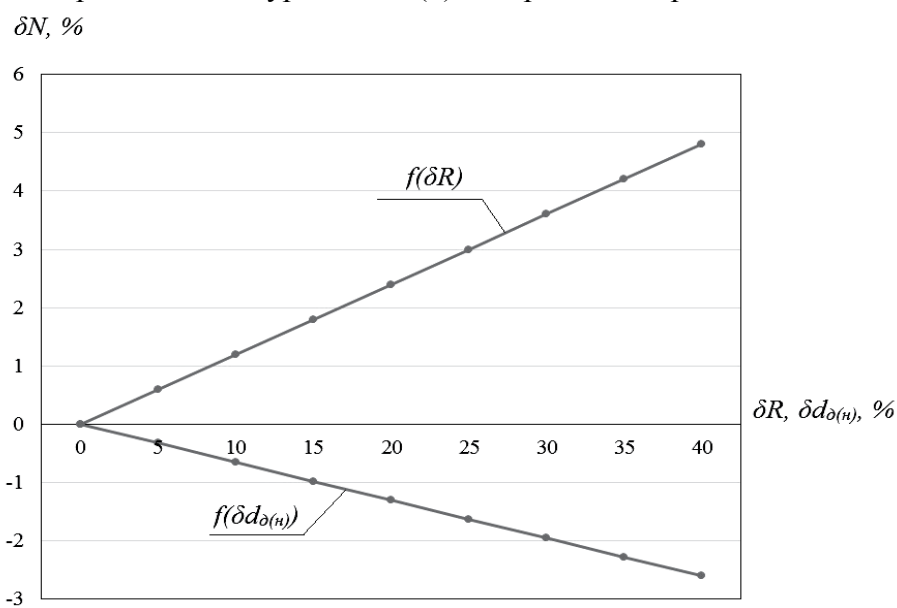


Рис. 2. Относительное изменение электрической мощности нагнетательного насоса от изменения некоторых конструктивных параметров геотермальной циркуляционной системы

Так как при относительном изменении глубины скважины в уравнении (9) коэффициент влияния имеет наименьшее значение, следовательно, изменение глубины скважины в меньшей степени отображается на изменении электрической мощности нагнетательного насоса. При увеличении расстояния между скважинами на 20–30 % и остальных неизменных конструктивных параметрах электрическая мощность насоса возрастет на 2,4–3,6 %. При увеличении диаметра добычной или нагнетательной скважины на 20–30 % электрическая мощность насоса уменьшится 1,3–2,0 %. Для определения более детальной оценки влияния конструктивных параметров системы на электрическую мощность нагнетательного насоса следует рассмотреть несколько вариантов режимов работы системы.

Выводы

Использование метода малых отклонений позволяет выполнить оценку влияния конструктивных параметров геотермальной циркуляционной системы на электрическую мощность нагнетательного насоса с достаточно большой точностью. Коэффициенты влияния при переменных в уравнении в малых отклонениях определяют значимость каждого параметра на целевую функцию и характер ее изменения в зависимости от изменения исходного параметра. Данный метод оценки может быть использован на стадиях технико-экономического обоснования и проектирования геотермальной циркуляционной системы теплоснабжения.

Список использованной литературы:

1. Богуславский Э. И. Технико-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр / Э. И. Богуславский. – Л.: ЛГИ, 1984. – 267 с.
2. Богуславский Э. И. Экономико-математическое моделирование геотермальных циркуляционных систем / Э. И. Богуславский. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1981. – 104 с.
3. Алхасов А. Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии / А. Б. Алхасов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
4. Джаватов Д. К. Оптимальное управление процессом добычи геотермального тепла в геотермальной циркуляционной системе / Д. К. Джаватов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – М.: 2008. – № 3. – С. 1-4.
5. Джаватов Д. К. Оптимизация разработки геотермальных месторождений системой горизонтальных скважин / Д. К. Джаватов // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – №1. – С. 94–97.
6. Редько А. А. Оптимизация параметров геотермальной циркуляционной системы теплоснабжения / А. А. Редько, В. С. Бугай // Науковий вісник Національного гірничого університету. — Дніпропетровськ: 2010. – №5. – С. 99–105.
7. Bugai V. Exergy and Economic Analysis of Effectiveness of Geothermal Heat Supply Systems / V. Bugai // 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering 2014. – Stanford University, California, USA. – 2014. – P. 249–252. Режим доступа: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2014/Bugai.pdf>
8. Черкез А. Е. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений / А. Е. Черкез. – М.: Машиностроение, 1975. – 355 с.
9. Антонова А. М. Использование метода малых отклонений для анализа эффективности тринарных парогазовых установок / А. М. Антонова, А. В. Воробьев, А. С. Матвеев, А. С. Орлов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 47–52.

References

1. Boguslavskiy, E. I. (1984), *Technical and economic assessment of development heat subsoil resources [Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka osvoeniya teplovykh resursov neдр]*, Leningrad, 267 p.
2. Boguslavskiy, E. I. (1981), *Economical and mathematical modelling of geothermal circulating systems [Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie geotermal'nykh tsirkulyatsionnykh sistem]*, Leningrad, 104 p.
3. Alkhasov, A. B. (2008), *Geothermal power engineering: problems, resources, technologies [Geotermal'naya energetika: problemy, resursy, tekhnologii]*, FIZMATLIT, Moscow, 376 p.
4. Dzhavatov, D. K. (2008), “Optimal control of geothermal heat production processes in geothermal circulation system” [“Optimal'noe upravlenie protsessom dobychi geotermal'nogo tepla v geotermal'noi tsirkulyatsionnoi sisteme”], *Devices and systems. Handling, control, diagnostic operations*, No. 3, P. 1-4.
5. Dzhavatov, D. K. (2007), “Optimization of geothermal deposits development with the system of horizontal wells” [Optimizatsiya razrabotki geotermal'nykh mestorozhdenii sistemoi gorizontal'nykh skvazhin], *Bulletin of HEIs. North Caucasian region. Engineering and industrial technology sciences*, No. 1, P. 94–97.
6. Redko, A. A., Bugai, V. S. (2010), “Optimization of parameters of geothermal circulating heat supply system” [“Optimizatsiya parametrov geotermal'noi tsirkulyatsionnoi sistemy teplosnabzheniya”], *Scientific Bulletin of National Mining University*, No. 5, P. 99–105.
7. Bugai, V. (2014), “Exergy and economic analysis of effectiveness of geothermal heat supply systems”, *39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering 2014*, Stanford University, P. 249–252. Available at: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2014/Bugai.pdf>
8. Cherkez, A. E. (1975), *Engineering calculations of gas turbine engines by small deviations [Inzhenernye raschety gazoturbinnnykh dvigatelei metodom malykh otklonenii]*, Mashinostroenie, Moscow, 355 p.
9. Antonova, A. M., Vorobyev, A. V., Matveev, A. S., Orlov, A. S. (2013), “Application of small deviation method to analyze the efficiency of ternary combined cycle gas turbine” [“Ispol'zovanie metoda malykh otklonenij dlja analiza jeffektivnosti trinarnykh parogazovykh ustanovok”], *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, No. 4, P. 47–52.

Поступила в редакцию 24. 09 2014 г.