УДК 622.837.003

Э.И.БОГУСЛАВСКИЙ, *д-р техн. наук, профессор, bogusl@spmi.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

E.I.BOGUSLAVSKY, *Dr. eng. sc., professor, bogusl@spmi.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ОСВОЕНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ – ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Сохранение России как великого государства, дальнейшее ее развитие и процветание в значительной мере зависит от возможностей обеспечить собственные энергетические нужды, а также экспорта топлива и электроэнергии. На этом историческом периоде энергоресурсы являются основным торговым источником пополнения государственного бюджета. Однако, ресурсы нефти, при сохранении объемов ее экспорта, быстро истощаются, природного газа – тоже не беспредельны. Запасы угля существенно уменьшились с распадом СССР, а оставшиеся требуют значительных инвестиций, повышения текущих затрат и характеризуются снижением качества углей. Возрастают дополнительные расходы на экологическую защиту окружающей среды.

Поиск альтернативы органическому топливу, сжигаемому в теплоцентралях, ведется уже не один десяток лет. Использование низкотемпературных источников тепловой энергии недр – одно из генеральных направлений в решении этой проблемы в XXI в. Это подтверждается определенными преимуществами геотермальных ресурсов, разработанностью научных основ их освоения, мировым промышленным опытом и спецификой систем теплоснабжения в стране.

Ключевые слова: альтернатива, тепловая энергия недр, органическое топливо, замена.

DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL RESOURCES – HIGHER EFFICIENCY IN UTILIZATION OF THE EARTH'S INTERIOR

Preservation of Russia as the great state, its further development and prosperity, appreciably depends on possibilities to provide its own power needs, and also fuel and electric power export. On this historical period, power resources are the basic trading source of replenishment of the state budget. However, oil resources, at preservation of volumes of its export, are quickly exhausted; natural gas is not boundless too. Coal stocks have essentially decreased with disintegration of the USSR, and the remained demand considerable investments, increase of current expenses and are characterised by decrease in quality of coals. Additional expenses on ecological protection of environment will increase.

Search of alternative to the organic fuel, burnt in heating plants, is conducted more than ten years. Use of low-temperature sources of thermal energy of resources is one of general directions in the decision of this problem in the XXI-st century. It proves to be true: certain advantages of geothermal resources, a readiness of scientific bases of their development, world industrial experience and specificity of systems of a heat supply in the country.

Key words: alternative, thermal energy of resources, organic fuel, replacement.

История использования теплоты недр Земли насчитывает несколько тысячелетий. Широкое применение терм в банях и бассейнах Римской империи описано в много-

численных источниках и сохранено в развалинах древних сооружений. Первая геотермальная скважина была пробурена в 1828 г., а первая геотермальная электростанция была построена в Лардарелло (Италия) в 1913 г., фонтанная технология геотермального теплоснабжения применяется в промышленных масштабах во многих странах мира.

Широкий практический интерес к развитию геотермальной энергетики проявился с начала 70-х годов в связи с известным энергетическим кризисом. Кроме того, все возрастающий интерес мировой общественности к экологическим проблемам, особенно принятие Киотского соглашения, в значительной мере содействовал развитию экологически чистых источников энергии.

Важными событиями в развитии недропользования следует считать освоение циркуляционных технологий, бинарного цикла производства электроэнергии и, в последние годы – широкого использования тепловых насосов в геотермальных системах. Произошла настоящая революции в прямом вытеснении традиционных топливных источников недр геотермальной энергией.

Таблица 1

Прямое использование тепловых ресурсов недр для теплоснабжения в странах мира на 2005 г.

Страна	Мощность, МВт	Использование	
		ГДж/год	ГВт·ч/год
Общее количество	27824,8	261418,0	72621,9
Китай	3687,0	45373,0	12604,6
Швеция	3840,0	36000,0	10000,8
Соединенные Штаты	7817,4	31239,0	8678,2
Исландия	1791,0	23813,0	6615,3
Турция	1177,0	19623,1	5451,3
Венгрия	694,2	7939,8	2205,7
Италия	606,6	7554,0	2098,5
Новая Зеландия	308,1	7086,0	1968,5
Бразилия	360,1	6622,4	1839,7
Грузия	250,0	6307,0	1752,1
Россия	308,2	6143,5	1706,7
Франция	308,0	5195,7	1443,4
Япония	413,4	5161,1	1433,8
Дания	821,2	4360,0	1211,2
Швейцария	581,6	4229,3	1174,9

По обобщающим материалам Мирового геотермального конгресса 2005 г. [7, 9, 12] в 71-й стране этот процесс идет с той или иной интенсивностью. Данные по 15 наиболее развитым странам приведены в табл.1. Прогрессирующее изменение структуры недропользования в сторону роста роли теплоты недр в энергообеспечении стран мира подтверждается следующими цифрами:

- в 1995 г. теплота недр активно использовалась только в 28 странах, в 2000 г. – 58 странах, а в 2005 – 71 стране;
- установленная тепловая мощность геотермальных теплогенерирующих установок в конце 2004 г. составила 27825 МВт, т.е. произошло двойное увеличение по сравнению с 2000 г.;
- количество используемой тепловой энергии недр увеличилось против 2000 г. почти на 40 % и составило 261418 ТДж/год (72622 ГВт·ч/год).

Основные направления использования тепловой энергии недр:

- 33 % для геотермальных тепловых насосов;
- 29 % для обогрева плавательных бассейнов (включая бальнеологию);
- 20 % для нагревания помещений (из них 77 % для теплоцентралей);
- 7,5 % для оранжерей и открытого нагревания грунтов;
- 4 % для подачи теплоты в производственные процессы;
- 4 % для аквакультуры;
- < 1 % для сельскохозяйственной сушки;
- < 1 % для таяния снега на дорогах и тротуарах;
- < 0,5 % для других целей.

Рассмотрим ранжирование стран по прямому использованию геотермальных ресурсов в 2005 г. Странами с наибольшей установленной мощностью были США, Швеция, Китай, Исландия и Турция, с ежегодным использованием геотермальной энергии – Китай, Швеция, США, Исландия, Турция, составляя приблизительно 66 % установленной мощности и 60 % ежегодного использования энергии. Однако, если рассматривать факторы площади страны или ее населения,

то доминируют меньшие страны. «Лучшие пять» – это Исландия, Израиль, Швейцария, Дания и Грузия (ТДж/площадь), и Исландия, Швеция, Новая Зеландия, Грузия и Дания (ТДж/население).

Мощность индивидуальных систем геотермального теплоснабжения находится в диапазоне от 5,5 кВт для жилого дома до больших объектов (от 150 кВт) для коммерческого и стандартного учреждения. Эквивалентное число установленных систем с тепловой мощностью 12 кВт (типичной для американских и западноевропейских домов) – приблизительно 1,3 млн.

Дальнейшее повышение эффективности недропользования за счет освоения тепловой энергии недр будет базироваться на широком освоении глубинных (до 3-4 тыс.м) геотермальных ресурсов. Решение этой проблемы обеспечивается созданными мировой и отечественной наукой основами освоения геотермальных ресурсов низкотемпературных естественных коллекторов:

– разработаны [2, 5, 6, 8, 14, 15] технологические схемы добычи теплоты недр геотермальными циркуляционными системами (ГЦС);

– разработаны [6] теоретические положения гидродинамических, теплофизических и геомеханических процессов при добыче тепловой энергии недр;

– разработана [3, 4, 6, 13, 15] методика геолого-экономической оценки геотермальных ресурсов и общие принципы оценки запасов геотермальных месторождений;

– выполнены [2, 8] картирование, районирование и оценка геотермальных ресурсов территории России;

– разработаны [2, 3, 11] методы технико-экономических расчетов параметров и показателей геотермальных циркуляционных систем (ГЦС), станций (систем) геотермального теплоснабжения (СГТ) и геотермальных электростанций (ГеоТЭС);

– созданы [4, 10] экономико-математические модели ГЦС, СГТ и ГеоТЭС, позволяющие оптимизировать их параметры и показатели для разработки технологических регламентов при проектировании этих установок;

– проведены экспериментальные и опытно-промышленные работы по научной и производственной проверке достоверности выполненных исследований и работоспособности технологических схем [2, 5, 6, 13, 14];

– накоплен и обобщен [2, 6, 13, 14] опыт промышленного освоения геотермальных ресурсов.

Существенно стимулируют использование тепловой энергии недр в районах России специфические особенности их теплоснабжения:

– высокая степень централизации систем теплоснабжения в городах и даже рабочих поселках;

– большой срок эксплуатации и почти полная изношенность тепловых сетей;

– дефицит и трудности доставки органического топлива к потребителям;

– компактность проживания населения в городах и даже в сельской местности.

Для разработки предпроектных документов: инвестиционных проектов, бизнес-планов и др. необходима информация по укрупненным, но достаточно достоверным параметрам и показателям строительства и эксплуатации СГТ. По заказам или просьбам администраций районов, руководителей промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных предприятий были определены технологические, энергетические и технико-экономические параметры и показатели СГТ. Расчеты выполнялись для нескольких десятков объектов, информация по некоторым из них, расположенных в различных регионах России, приведена в табл.2.

ВЫВОДЫ

1. Освоение нового энергетического ресурса недр, сосредоточенного в низкотемпературных термоводоносных горизонтах технически возможно и экономически целесообразно на значительных территориях России.

Таблица 2

Исходные данные для проектирования и технико-экономические показатели СГТ

Параметры и показатели	Единицы измерения	Калининградская область		Якутия		Камчатка		Вологодская область	Псковская область	Костромская область	Ярославская область	
		Девон	Кембрий	Вилюйск	Вуктыл	Участок 1	Участок 2	Девон	Палкино	Буй	Медягино	Рыбинск
Исходные данные												
Теплопроизводительность СГТ*	ГДж/ч	40	40	25	25	25	25	100	36	57	25	5
Температура сетевой воды**	°С	90	90	90	90	90	90	90	90	110	90	90
Температура сетевой воды***	°С	40	40	40	40	40	40	55	55	70	55	55
Температура пород коллектора	°С	40	70	110	55	115	140	50	50	53	56	25
Проницаемость пород коллектора	дарси	3,0	1,7									
Мощность коллектора	м	75	45	500	800	300	300	137	40	174	104	125
Глубина добычной скважины	м	1000	2000	3350	2100	1600	2200	1644	900	1970	2190	1030
Цена на воду за 1 $м^3$	дол.	0,01	0,01	0,1	0,1	0,09	0,09	–	0,011	0,8	0,01	0,1
Цена за 1 кВт·ч электроэнергии	дол.	0,047	0,047	0,05	0,05	0,05	0,05	–	0,02	0,06	0,05	0,05
Цена на топливо за 1 т у.т.	дол.	87	87	124	124	124	124	–	57	110	129	124
Коэффициент дисконтирования,ГДж/ч		0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	–	–	0,09	0,9	0,09
Технико-экономические показатели												
Годовая выработка теплоты	ТДж/г	146,0	172,0	130,0	102,0	105,0	115,0	370,0	116,0	201,2	87,3	17,6
Годовая экономия орган. топлива	тыс.т у.т.	6,26	7,39	5,58	4,4	4,5	4,94	15,9	4,97	8,65	3,75	0,76
Годовой расход электроэнергии	ГВт·ч/г	14,9	12,6	4,35	8,95	3,68	1,61	31,0	11,0	18,1	7,93	1,71
Условный расход топлива*	тыс.т у.т.	5,07	4,3	1,48	3,04	1,25	0,547	10,5	3,73	6,17	2,69	0,58
Удельный расход электричества	кВт·ч/ГДж	102,4	73,5	33,5	87,4	35,2	14,0	83,9	94,8	90,2	90,6	97,4
Годовая выработка теплоты ЭК**	тыс.т у.т.	1,83	1,55	0,535	1,1	0,45	0,198	3,8	1,35	2,23	0,97	0,21
Капиталовложения на СГТ	млн дол.	2,40	2,81	3,66	2,77	2,15	1,39	9,9	1,12	2,49	1,25	0,89
Годовые эксплуатационные затраты	млн дол.	1,02	0,89	0,747	0,842	0,468	0,315	3,39	0,41	1,25	0,373	0,29

Окончание табл.2

Параметры и показатели	Единицы измерения	Калининградская область		Якутия		Камчатка		Вологодская область	Псковская область	Костромская область	Ярославская область	
		Девон	Кембрий	Вилюйск	Вуктыл	Участок 1	Участок 2	Девон	Палкино	Буй	Медягино	Рыбинск
Годовая выплата кредита и процентной ставки	тыс.дол.	228	257	335	254	166	127	234	–	240	88	–
Средняя себестоимость 1 ГДж	дол.	6,99	5,17	7,28	8,25	6,36	4,97	9,16	3,53	6,22	7,74	16,48
Капиталовложения на АК***		3,0	3,0	5,93	3,95	3,95	3,95	12,1	1,62	4,09	2,18	0,92
Себестоимость 1 ГДж от АК	млн дол.	7,46	7,46	11,51	10,73	10,64	10,64	10,73	4,18	7,77	9,45	18,26
Коэффициент экономической целесообразности****	–	1,21	1,63	1,58	1,30	1,67	2,14	1,17	1,18	1,25	1,22	1,11
Чистая дисконтированная стоимость	млн дол.	2,98	11,32	10,07	3,54	9,08	14,90	4,60	0,75	5,30	2,48	0,09

* Условный расход топлива на выработку электроэнергии, потребляемой СГТ на собственные нужды.
** Годовая выработка теплоты электрокотельной за счет электроэнергии, расходуемой СГТ на собственные нужды.
*** Капиталовложения на строительство альтернативной топливной котельной.
**** Отношение приведенных затрат на выработку теплоты в топливной котельной к СГТ.

2. Масштабы добычи и использования экологически чистой геотермальной энергии в XXI в. должны обеспечить ее значимую роль в топливно-энергетическом балансе России.

3. Широкий диапазон целесообразной теплопроизводительности модуля СГТ, его конкурентоспособные параметры и показатели по сравнению с котельными на традиционных видах природного топлива позволяют использовать низкотемпературную геотермальную энергию для потребителей на значительной части территории, обеспеченной геотермальными ресурсами.

4. Рассмотренные примеры параметров и показателей СГТ в различных регионах России и для разных требований заказчиков позволяют оценить конкретные характеристики геотермальных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богуславский Э.И.* Методические принципы геолого-экономической оценки тепловых ресурсов недр. Экономический механизм рационального использования и охраны недр. М.: Изд-во МГУ, 1980.

2. *Богуславский Э.И.* Технико-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр. Л.: Высшая школа, 1984.

3. *Богуславский Э.И.* Принципы бизнес-планирования на стадии технико-экономических обоснований геотермальных систем теплоснабжения / Э.И.Богуславский, Г.С.Табаченко // Сборник трудов молодых ученых СПГТИ / СПГТИ. СПб, 1995.

4. *Богуславский Э.И.* Экономико-математическое моделирование систем извлечения и использования тепла Земли / ЛГИ. Л., 1981.

5. Геотермальная технология низкопотенциальных высокоминерализованных пластовых вод / Б.Н.Хахаев, Л.А.Певзнер, И.И.Самхан, Э.И.Богуславский, А.В.Шурчков // Разведка и охрана недр. 1994. № 1.

6. *Дядькин Ю.Д.* Разработка геотермальных месторождений. М.: Недра, 1989.

7. *Curtis R., Lund J., Sanner B., Rybach L., Hellström G.* Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere: Current Worldwide Activity. Geothermal Energy 2005 / World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

8. Development of geothermal resources of Moscow artesian basin. Proceedings of the World Geothermal Congress. 1995 / Emil I. Boguslavsky, Anna B.Vaineblat, Lev A.Pevzner, Anatoly A.Smyslov, Bilat N. Khakhaev. Florence, Italy, 18-31 May 1995, Vol.1.

9. *Bertani Ruggero.* World Geothermal Generation in 2001-2005: State of the Art. Proceedings // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

10. *Boguslavsky Emil.* Economic-Mathematical Modelling of Geothermal Circulation Systems and Optimization of their Parameters. Proceedings of the World Geothermal Congress, 1995. Florence, Italy, 18-31 May 1995. Vol.4.

11. *Boguslavsky E.I.* The economy of utilization and potential of low-temperature geothermal resources in the regions of the central Russia // Groundwater and Geothermal Energy. Proceedings of Latvian-Danish Seminar. Vol.3. Riga – Copenhagen, 1994.

12. *Lund John W., Freeston Derek H., Boyd Tonya L.* World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005 // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

13. *Lund John W.* Direct Utilization of Geothermal Energy. Problems of use of geothermal energy // The International Symposium «Problem of geothermal energy». 1995. Vol.3.

14. *Mahler Allan.* Geothermal Plant in Thisted, Denmark With Absorption Heat Pump. Problems of use of geothermal energy // The International Symposium «Problems of Geothermal Energy». 1995.Vol.3.

15. Systems of geothermal supply on the base of low temperature aquifers of Moscow syneclise / Emil I. Boguslavsky, Lev A. Pevzner, Igor I.Samkhan. Geothermische Energie. Nutzung, Erfahrung, Perspektive. Schwerin. 1994.

REFERENCES

1. *Boguslavsky E.I.* Methodical principles of geologo-economic estimation of thermal resources. The economic mechanism of rational use and protection of resources. The Moscow State University, 1980.

2. *Boguslavsky E.I.* Technical and economic estimation of development of thermal resources. L: The Higher School, 1984.

3. *Boguslavskj E.I., Tabachenko G.S.* Business planning principles at the stage of feasibility reports on geothermal systems of a heat supply // The collection of works of post-graduate students and students SPGGI. / SPGGI, 1995.

4. *Boguslavsky E.I.* Economic-mathematical modelling of systems of extraction and use of heat of the Earth. L., LGU, 1981.

5. Geothermal technology for low-potential highly-mineralised formation fluids / B.N.Hahaev, L.A.Pevzner, I.I.Samhan, E.I.Boguslavsky, A.V.Shurchkov // Investigation and protection of resources. 1994. N 1.

6. *Djadkin Ju.D.* Mining of geothermal deposits. Moscow: Nedra, 1989.

7. *Curtis R., Lund J., Sanner B., Rybach L., Hellström G.* Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere: Current Worldwide Activity. Geothermal Energy 2005 / World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

8. Development of geothermal resources of Moskow artesian basin. Proceedings of the World Geothermal Congress. 1995 / Emil I. Boguslavsky, Anna B.Vaineblat, Lev A.Pevzner, Anatoly A.Smyslov, Bilat N. Khakhaev. Florence, Italy, 18-31 May 1995, Vol.1.

9. *Bertani Ruggero.* World Geothermal Generation in 2001-2005: State of the Art. Proceedings // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

10. *Boguslavsky Emil.* Economic-Mathematical Modelling of Geothermal Circulation Systems and Optimization of their Parameters. Proceedings of the World Geothermal Congress, 1995. Florence, Italy, 18-31 May 1995. Vol.4.

11. *Boguslavsky E.I.* The economy of utilization and potential of low-temperature geothermal resources in the regions of the central Russia // Groundwater and Geothermal Energy. Proceedings of Latvian-Danish Seminar. Vol.3. Riga – Copenhagen, 1994.

12. *Lund John W., Freeston Derek H., Boyd Tonya L.* World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005 // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

13. *Lund John W.* Direct Utilization of Geothermal Energy. Problems of use of geothermal energy // The International Symposium «Problem of geothermal energy». 1995. Vol.3.

14. *Mahler Allan.* Geothermal Plant in Thisted, Denmark With Absorption Heat Pump. Problems of use of geothermal energy // The International Symposium «Problems of Geothermal Energy». 1995.Vol.3.

15. Systems of geothermal supply on the base of low temperature aquifers of Moscow syneclise / Emil I. Boguslavsky, Lev A. Pevzner, Igor I.Samkhan. Geothermische Energie. Nutzung, Erfahrung, Perspektive. Schwerin. 1994.