УДК 550.36:622.323

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

E.I. BOGUSLAVSKIY, *Dr. in eng. sc., professor, boguslEI@yandex.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Дефицит органического топлива и необходимость защиты окружающей среды вызывают рост темпов освоения практически неисчерпаемых, повсеместно распространенных и экологически чистых геотермальных ресурсов. Для нужд теплоснабжения важное значение имеет активно развивающаяся инновационная технология освоения приповерхностных геотермальных ресурсов.

Для проектирования и строительства приповерхностных систем геотермального теплоснабжения (ПСГТ) необходима оперативная разработка технологических регламентов, содержащих оптимальные параметры и показатели ПСГТ. Разработана имитационная экономико-математическая модель, созданы алгоритм и программа их оптимизации. Проведены компьютерные расчеты для широкого круга природных, энергетических и экономических условий. Определены основные параметры и показатели ПСГТ. Рекомендованы оптимальные их значения для теплоснабжения локальных потребителей (жилых домов) в условиях Ярославской области.

Ключевые слова: разработка, приповерхностные, геотермальные, месторождения, имитационное моделирование, теплоснабжение, локальные потребители, технологический регламент.

THERMAL, POWER AND ECONOMIC PARAMETERS OF INNOVATIVE TECHNOLOGY OF DEVELOPMENT OF NEARSURFACE GEOTHERMAL DEPOSITS

Deficiency of organic fuel and necessity of protection of environment cause growth of rates of development practically inexhaustible, everywhere widespread and ecologically pure geothermal resources. For needs of a heat supply especially actively developing innovative technology of development of near-surface geothermal resources has great value.

Operative mining of the production schedules containing optimum parametres and indicators PSGT is necessary for designing and building of near-surface systems of a geothermal heat supply (PSGT). The imitating economic-mathematical model is developed, the algorithm and the program of their optimisation are created. Computer calculations for a wide range of natural, power and economic conditions are carried out. Key parametres and indicators PSGT are defined. Their optimum values for a heat supply of local consumers (apartment houses) in the conditions of the Yaroslavl area are recommended.

Key words: mining, near-surface, geothermal, fields, imitating modelling, a heat supply, local consumers, technological order.

Приповерхностные системы геотермального теплоснабжения. Напряженность топливно-энергетического баланса России и отдельных ее регионов, вызванная значи-

тельным удорожанием и дефицитом органического и ядерного топлива, региональным обособлением и возросшими расходами на транспорт, ухудшением экологической ситуации и увеличением затрат на защиту окружающей среды, настоятельно диктует необходимость освоения нетрадиционных источников энергии.

Наибольший интерес, основанный на широком применении в мировой практике, представляют перспективы инновационной технологии освоения теплоты приповерхностных толщ недр для теплоснабжения городского и сельского населения России. Строительство и эксплуатация приповерхностных систем геотермального теплоснабжения (ПСГТ) развивается высокими темпами, и в мировой энергетике функционирует более миллиона таких установок [3-5].

Освоение этого нового и перспективного источника энергии вызывает необходимость создания аппарата технико-экономических исследований и оптимизации параметров и показателей этих горно-энергетических систем. По установившемуся, начиная с 20-х гг. прошлого века, опыту наилучшим средством решения этих проблем признано экономико-математическое моделирование.

ПСГТ – это горно-энергетическая установка, обеспечивающая потребителя теплотой в заданных им параметрах, режимах и количествах. Как правило, она состоит из подземного добывающего комплекса – геотермальной технологической системы (ГТС) и поверхностных сооружений: тепловых насосов для термотрансформации теплоносителя, баков-аккумуляторов и теплотрасс. Специфической особенностью ПСГТ является совмещение в одной установке горно-технологической и энергетической систем, что вызывает многофакторную и сложную функциональную связь условий и результатов ее работы. Во взаимовлиянии действуют природные условия, конструктивные и технологические параметры, эксплуатационные режимы, энергетические, экономические и социально-экологические факторы и ограничения.

Для системной оптимизации геотермальных установок автором в 1970 г. была разработана первая имитационная экономико-математическая модель (ИЭММ), а к настоящему времени создана группа моделей, имитирующих функционирование таких систем при различных технологиях добычи теплоты недр и разных целях ее использования [1, 2].

В алгоритмированном и запрограммированном виде имитационные модели позволяют вести численные расчеты на персональных компьютерах в режиме автоматического перебора или (и) диалога, когда модель ПСГТ (рис.1) функционирует как подобие приповерхностной системы геотермального теплоснабжения. При этом проводится управляемая серия экспериментов (задаются независимые переменные), в ходе которой исследуемая система создается и функционирует сотни и тысячи раз в соответствии с действующими внешними (природными, потребительскими, экономическими, экологическими, социальными и пр.) условиями или требованиями и наложенными пользователем ограничениями целевого, технического, организационного, управленческого, социального и другого характера.

В качестве решения одной из задач экономико-математического моделирования, на базе разработанной модели ПСГТ, оценено влияние основных природных факторов на технико-экономические параметры и показатели (ТЭП) геотермального теплоснабжения при разработке низкотемпературных термоводоносных горизонтов.

В качестве управляющих переменных приняты глубина залегания продуктивной толщи пород (40; 100 и 200 м), температура пород на забое скважины (8; 10 и 13 °С), расход теплоносителя через одну скважину (0,5; 1,0; 2,0 и 4,0 $м^3$/ч), расстояние между скважинами (10; 15; 20; 30 и 40 м). В качестве инвариантных констант задавались теплопроизводительность ПСГТ из расчета теплоснабжения отдельного дома на пять членов семьи (91 МДж/ч), диаметр водовыдающей трубы (0,1 м), теплофизические свойства пород толщи и теплоносителя, мощность водоносного горизонта, коэффициент фильтрации в водоносном горизонте и др.

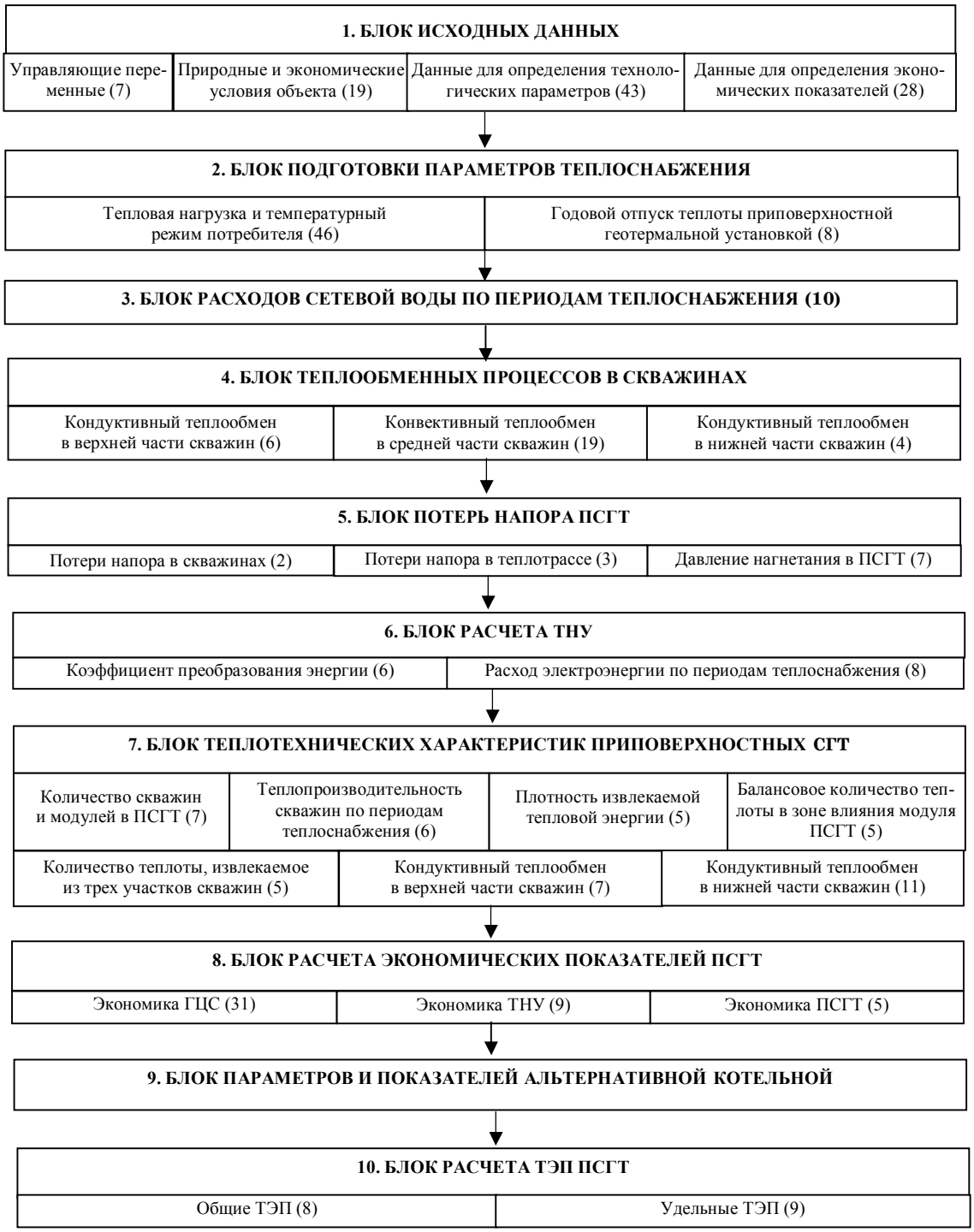


Рис.1. Структура и содержание имитационной экономико-математической модели ПСГТ.
В скобках указано количество операндов алгоритма и программы

Главная особенность конструкции ПСГТ – обязательное использование теплонасосных установок (ТНУ). Они являются главными потребителями электроэнергии, поднимая температурный потенциал геотермального теплоносителя до требований отопительных приборов. Эффективность работы ТНУ и ПСГТ характеризует коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую. Он определяет удель-

ный расход электроэнергии (рис.2), общий ее расход и потребляемую ТНУ мощность (рис.3). Они существенно меняются по климатическим (стандартным) периодам теплоснабжения жилого дома. Расчет велся для условий Ярославской области.

Оценка конструктивных и технологических параметров ПСГТ. К основным конструктивным параметрам ПСГТ относятся расстояние между скважинами и диаметр скважины, длина теплотрассы, диаметр наружной теплотрассы, максимальное количество модулей скважин в работе, к основным технологическим параметрам ПСГТ – температура теплоносителя на выходе из добычной ветви U-образной трубы, максимальный расход теплоносителя по ГЦС, суммарное максимальное давление нагнетания в ГЦС.

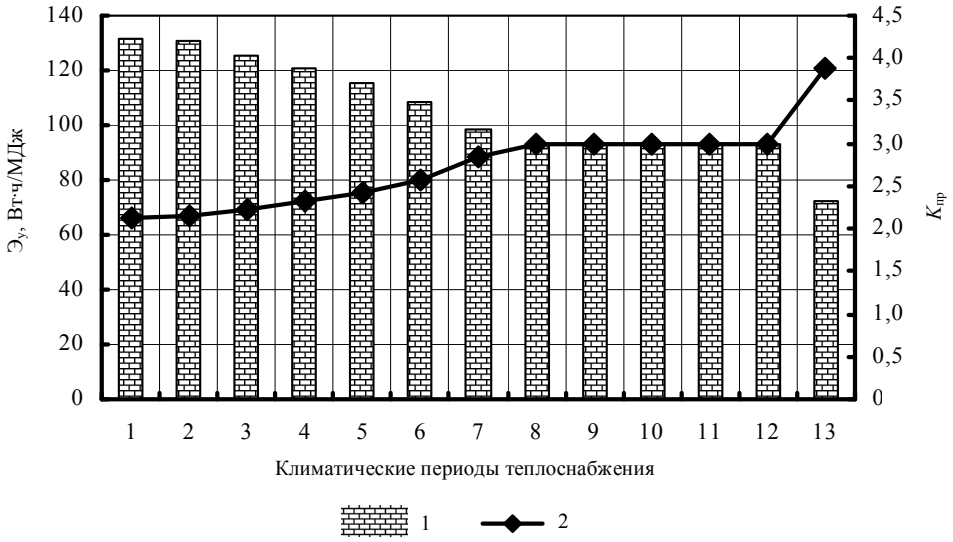


Рис.2. Удельный расход электроэнергии $Э_у$ (1) и коэффициент преобразования ТНУ $K_{пр}$ (2)

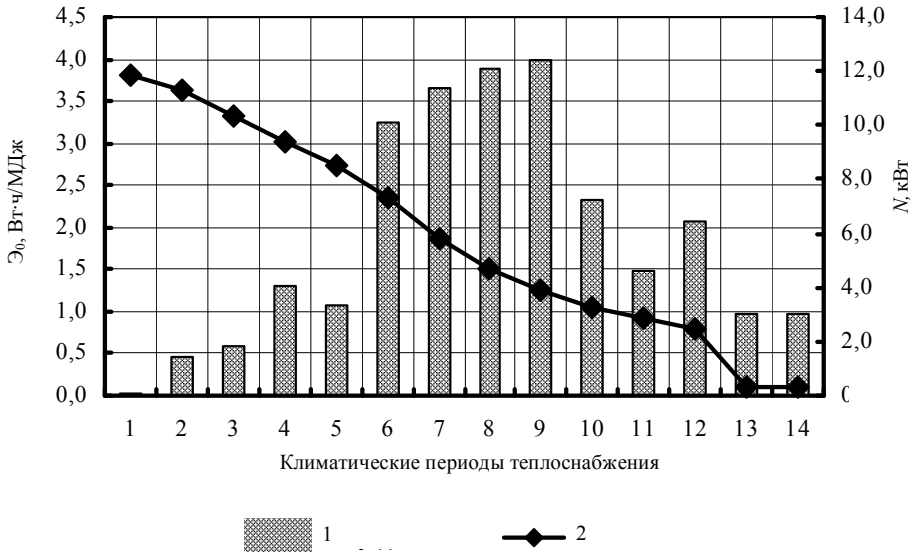


Рис.3. Расход электроэнергии $Э_0$ (1) и потребляемая ТНУ мощность N (2) по климатическим периодам теплоснабжения

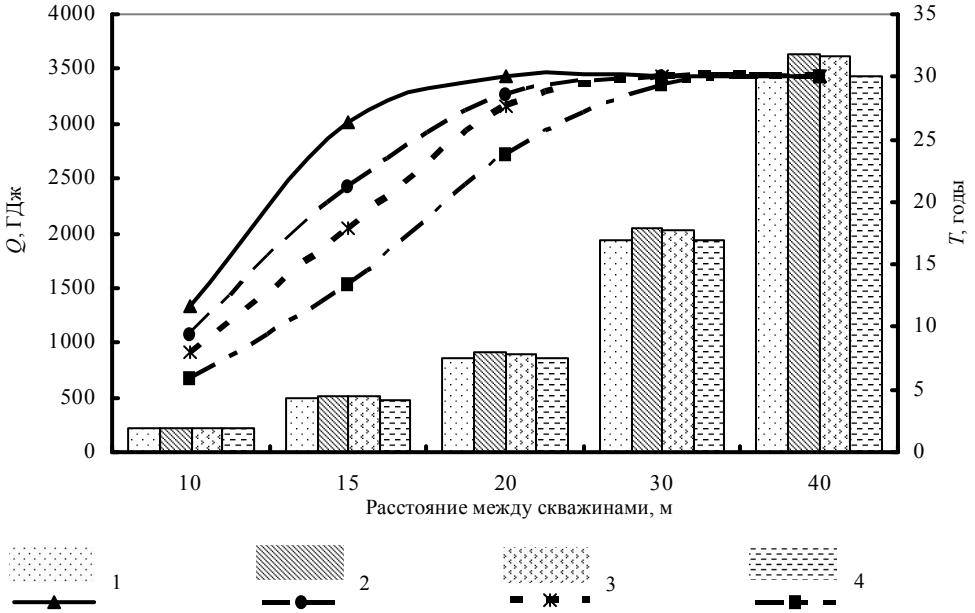


Рис.4. Количество извлеченной теплоты одним модулем ГЦС Q (гистограмма) и его срок службы T (кривые) в зависимости от расстояния между скважинами при глубине скважин 100 м

1 – при W = 0,5 м^3/ч; 2 – при W = 1 м^3/ч; 3 – при W = 2 м^3/ч; 4 – при W = 4 м^3/ч

Влияние расстояния между скважинами (от 10 до 40 м) и расхода теплоносителя W (от 0,5 до 4,0 м^3/ч) на количество извлекаемой тепловой энергии и срок службы модуля (рис.4), позволяет оценить взаимосвязь этих конструктивных и технологических параметров. Следует отметить, что при увеличении расстояния между скважинами за пределы 20 м количество извлекаемой тепловой энергии практически не растет.

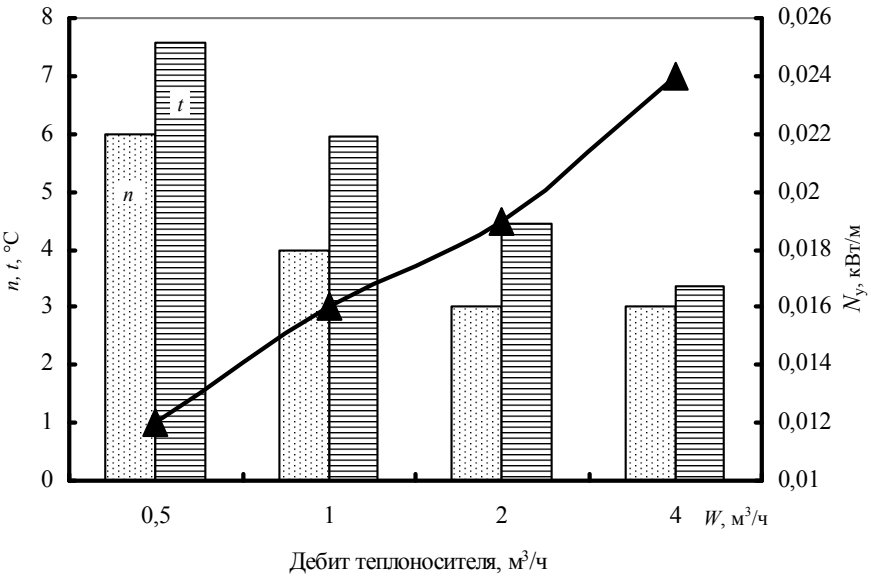


Рис.5. Количество модулей в СГТ n, температура теплоносителя t на выходе из скважины (гистограмма) и ее энергетическая мощность на 1 м длины N_y (кривая) в зависимости от расхода теплоносителя при расстоянии между скважинами 10-40 м

Максимальное количество модулей в ПСГТ в первую очередь зависит от температуры теплоносителя на выходе из ГЦС. Оба эти параметра связаны с тепловой мощностью скважины (на 1 м ее длины) и дебетом теплоносителя. Рис.5 иллюстрирует вполне понятную взаимосвязь конструктивных, технологических и эксергетических параметров и показателей.

Оптимизация экономических показателей. Оптимальный вариант ПСГТ определялся из оценки по следующим главным и дополнительным экономическим критериям: NPV за весь срок службы ПСГТ, приведенным затратам на производство теплоты ПСГТ, коэффициенту экономической целесообразности, себестоимости производства теплоты.

Изменение этих показателей в зависимости от расстояния между скважинами и их дебита (рис.6-8) позволяет выбрать оптимальный вариант ПСГТ для конкретной глубины скважины, т.е. мощности ресурсной толщи. При этом следует иметь в виду, что в результате оптимизационных расчетов был принят следующий режим работы скважин: 0,5 ч прокачки теплоносителя, затем 0,5 ч простоя для компенсации охлаждения приконтактных пород за счет кондуктивного теплопритока из окружающего массива. Такой режим обеспечивает определенный резерв в работе скважин, но вызывает необходимость в строительстве и эксплуатации двух скважин в модуле ПСГТ.

Исходя из результатов экономико-математического моделирования и определения оптимальных параметров ПСГТ жилого дома на семью из пяти человек для условий Ярославской области были выбраны следующие параметры: дебит добычной скважины 2 м^3/ч, диаметр скважины 0,32 м, диаметр става труб в скважине 0,1 м, расстояние между скважинами 30 м при глубине 40 м и 20 м при глубине 100 и 200 м.

Для условий каждого из 17 районов Ярославской области по исходным геолого-геотермическим данным было проведено экономико-математическое моделирование и определены оптимальные параметры и показатели ПСГТ.

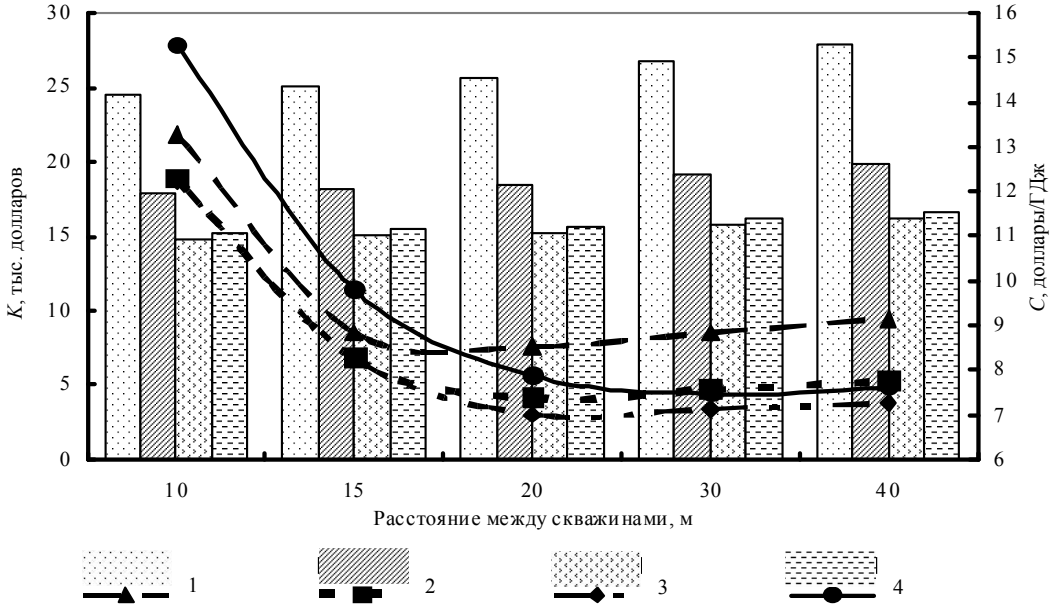


Рис.6. Инвестиции в ПСГТ *K* (гистограмма) и себестоимость производства теплоты *C* (кривые) в зависимости от расстояния между скважинами

1 – при W = 0,5 м^3/ч; 2 – при W = 1 м^3/ч; 3 – при W = 2 м^3/ч; 4 – при W = 4 м^3/ч

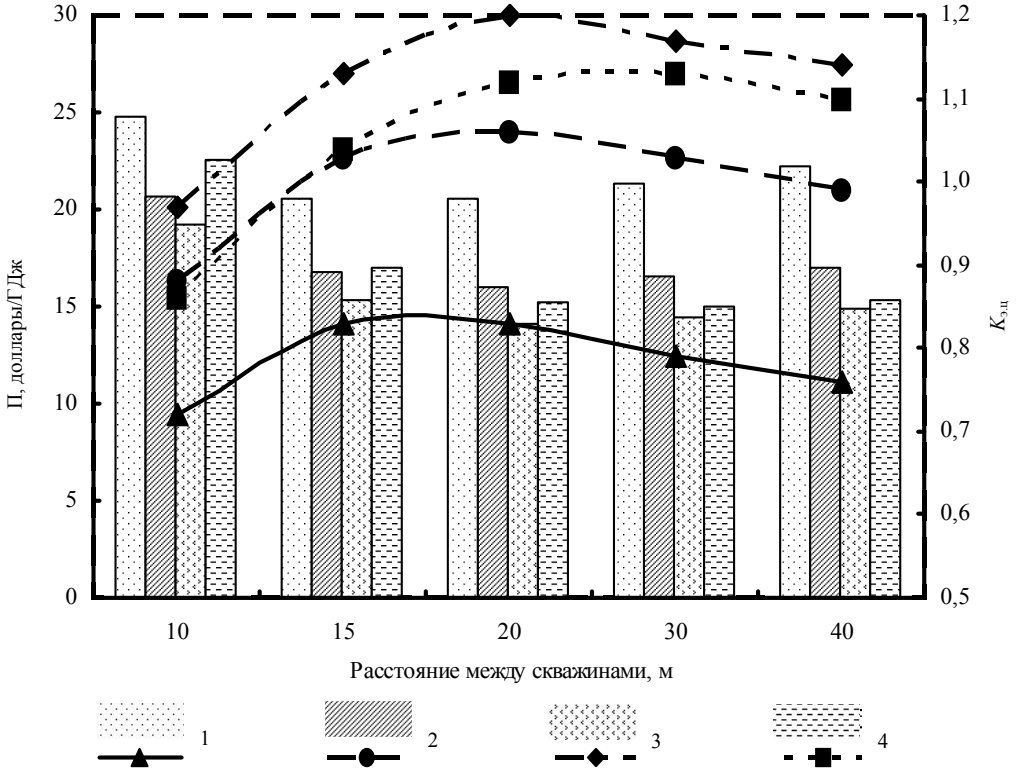


Рис.7. Приведенные затраты П (гистограмма) и коэффициент экономической целесообразности производства теплоты $K_{э.ц}$ (кривые) в зависимости от расстояния между скважинами. Усл. обозначения см. на рис.6

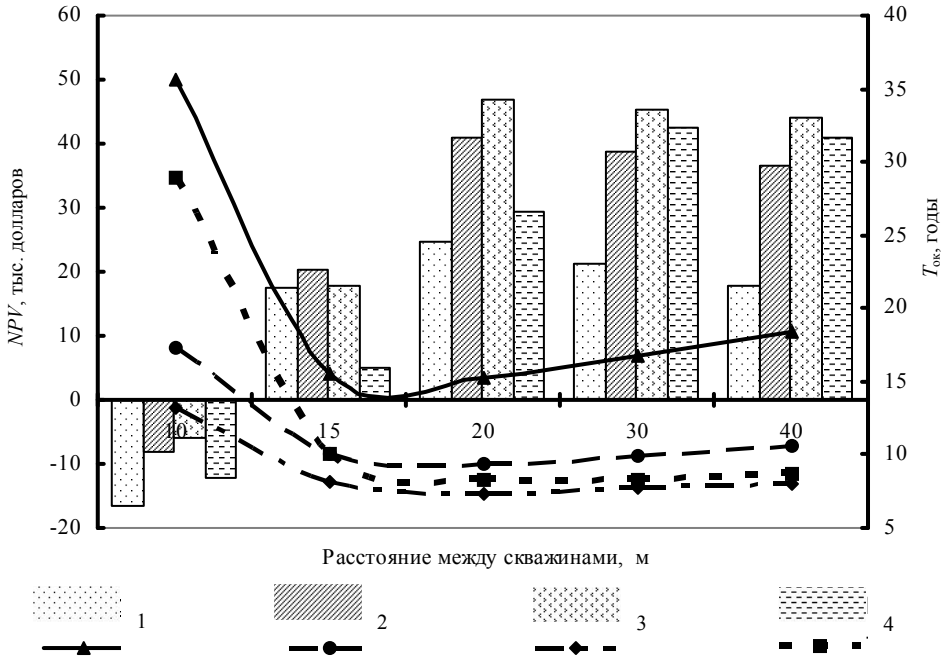


Рис.8. Показатель *NPV* (гистограмма) и срок окупаемости СГТ $T_{ок}$ (кривые) в зависимости от расстояния между скважинами. Усл. обозначения см. на рис.6

Выводы

1. Совмещение в ПСГТ горно-технологической и энергетической систем вызывает многофакторную и сложную функциональную связь условий и результатов ее работы. При этом взаимодействуют природные условия, конструктивные и технологические параметры, эксплуатационные режимы, энергетические, экономические и социально-экологические факторы и ограничения. Все это предопределяет необходимость использования аппарата экономико-математического моделирования (ЭММ).

2. Наиболее адекватными представляются ЭММ блочной структуры, построенные в виде древовидного (иерархического) плоского неориентированного графа с целевой функцией в главной вершине, уравнениями эндогенных переменных в частных вершинах и связью между ними по ребрам (ветвям).

3. Широкое применение экономико-математическое моделирование получило при геолого-экономической оценке и картировании геотермальных ресурсов, определении оптимальных параметров геотермальных установок в различных природных и экономических условиях, разработке технико-экономических обоснований, рекомендаций в проектную документацию и других работах.

4. В данной работе была создана новая имитационная экономико-математическая модель ПСГТ и программа оптимизации ее параметров и показателей, что позволило выполнить оценку и картирование перспективных приповерхностных геотермальных ресурсов Ярославской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богуславский Э.И.* Экономико-математическое моделирование систем извлечения и использования тепла Земли: Учеб. пособие / Ленинградский горный ин-т. Л., 1981.

2. *Богуславский Э.И.* Экономико-математическое моделирование и оптимизация параметров систем извлечения тепла Земли в районах Северо-Востока СССР / Э.И.,Богуславский Ю.М.Парийский, Г.Н.Герасименко // Проблемы горной теплофизики: Сб. науч. тр. / Ленинградский горный ин-т. Л., 1973.

3. *Bertani R.* World Geothermal Generation 2001-2005: State of the Art Proceedings // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 2005.

4. *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, 2005.

5. *Lund J.-W., Derek H., Boyd T.-L.* World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005 // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 2005.

REFERENCES

1. *Boguslavskiy E.I.* Economic-mathematical modelling of systems of extraction and use of heat of the Earth: The manual / Leningrad Mining Institute. Leningrad, 1981.

2. *Boguslavskiy E.I., Parijskij J.M., Gerasimenko G.N.* Economic-mathematical modelling and optimisation of parametres of systems of extraction of heat of the Earth in Northeast USSR areas // Problems of mining thermophysics / Leningrad Mining Institute. Leningrad, 1973.

3. *Bertani R.* World Geothermal Generation 2001-2005: State of the Art Proceedings // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 2005.

4. *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, 2005.

5. *Lund J.-W., Derek H., Boyd T.-L.* World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2005 // World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 2005.