

ОСТАПЧУК О.Н., СТЕЦЕНКО В.Ю., ПЯТЫШКИН Г.Г. (Донецкий национальный технический университет)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕТРОГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ЗЕМЛИ

Раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів сьогодні є однією з глобальних світових проблем. Одним з перспективних напрямів рішення цієї проблеми є застосування нових енергозберігаючих технологій, що використовують нетрадиційні поновлювані джерела енергії (НПДЕ). Ця стаття містить короткий огляд петрогеотермальних джерел енергії та можливості їх розрахунку за допомогою чисельних методів.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов сегодня представляет собой одну из глобальных мировых проблем. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является применение новых энергозберігаючих технологий, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии (НВИЭ). Данная статья содержит краткий обзор петрогеотермальных источников энергии и возможности их расчета с помощью численных методов.

Rational fuel and energy using today represents one of the global problems. One of the perspective ways to solve this problem is application of the new energy saving technologies using nonconventional renewed energy sources (NRES). Given article is about using geothermal energy received from rocks and an opportunity of by means of numerical methods.

В настоящее время потребность в органическом топливе удовлетворяется за счет собственной добычи на 44 % от существующего уровня потребления (170 млн. т. у. т.), что говорит о принадлежности Украины к энергодефицитным странам.

Вследствие объективных факторов Украине угрожает энергетический вакуум. В связи с этим, а также истощением запасов традиционного ископаемого топлива [1-3], и экологическими последствиями его сжигания возрастает интерес к альтернативным технологиям [3-5]. Технологии теплоснабжения, использующие нетрадиционные источники энергии, позволяют значительно сократить затраты энергии в системах жизнеобеспечения зданий и сооружений, обеспечить экологическую чистоту их использования и повысить степень автономности систем жизнеобеспечения. По всей видимости, в недалеком будущем именно эти качества будут иметь определяющее значение в формировании конкурентной ситуации на рынке теплогенерирующего оборудования.

Одним из перспективных видов нетрадиционной энергии является тепло Земли [4-8]. В течение последних 10-ти лет в Украине усилиями геологов велись работы по изучению геотермических условий недр и оценке таких ресурсов (табл. 1). По результатам этих работ построены геотермические карты [8-12] оценены ресурсы термальных вод и геотермальной энергии, содержащейся в сухих горных породах.

Украина располагает значительными ресурсами геотермальной энергии, потенциальные запасы которой оцениваются величиной 10^{22} Дж. Это эквивалентно запасам топлива $3.4 \cdot 10^{11}$ у. т.

Геотермальную энергию в зависимости от температуры теплоносителя делят на высоко- и низкопотенциальную [4-7, 9]. Низкопотенциальной геотермальной энергией называют такую, которая нагревает теплоноситель до температуры фазового перехода. С другой стороны, энергия Земли может быть представлена в виде гидрогеотермальной и петрогеотермальной энергии – в зависимости от источника передачи тепла. Источником гидротермальных ресурсов являются термальные воды, пароводяные смеси и перегретый пар, нагретые в результате геологических процессов до высокой температуры, что позволяет их использовать для теплоснабжения зданий. Источником петрогеотермальной энергии – тепло сухих горных пород. Его можно использовать в разных климатических условиях и в разные времена года (интенсивность энергопотока не зависит от солнечной активности).

Подсчитано, что температура ядра Земли достигает около 50000°C [5]. Общий тепловой баланс первых 10 км земной коры составляет почти $3 \cdot 10^{23}$ ккал $\times 4,1868$ кДж = $12,5604 \cdot 10^{23}$ кДж, что в тысячи раз превышает теплотворную способность мировых запасов всех видов топлива. Ориентировочные расчеты показывают, что в Земле содержится теплоты намного больше, чем ее можно было бы добыть, расщепив в ядерных реакторах все земные запасы урана и тория. Если человечество будет использовать одну только геотермальную энергию, пройдет 41 млн. лет, прежде чем температура недр Земли понизится на полградуса [5].

Таблица 1 – Общая характеристика геотермальных ресурсов

Тип ресурсов	Локализация (вид) ресурсов	Распространение	Преобладающий тип природного теплоносителя	Температура на глубине 3-4 км, °С
Гидрогеотермальные	Трещинно-жильные месторождения	Локальное	Пар Термальные воды	До 300
	Артезианские бассейны	Региональное		До 150
Петрогеотермальные	Магматические очаги	Локальное	Расплавы Твёрдые горные породы	До 1200
	Зоны термоаномалий			До 400
	Районы повышенного геотермического градиента	Региональное		До 150
	Области развития осадочного чехла	Глобальное		До 100

Тепловой режим поверхностных слоев Земли формируется под действием двух основных факторов – падающей на поверхность солнечной радиации и потоком тепла из земных недр. Сезонные и суточные изменения интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха вызывают колебания температуры верхних слоев. Глубина проникновения суточных колебаний температуры наружного воздуха и интенсивности падающей солнечной радиации в зависимости от конкретных почвенно-климатических условий достигает порядка 30 м.

Температурный режим слоев, расположенных ниже глубины «нейтральной зоны», формируется под воздействием тепловой энергии, поступающей из недр Земли [13]. Тепловая энергия недр образуется за счет расщепления радионуклидов ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K и т.д. в ядре Земли. Продолжительный период их полураспада (который пропорционален суммарному возрасту Земли) позволяет считать их неиссякаемым источником тепловой энергии. В земную кору тепло поступает из подкорковых геосфер с помощью кондуктивного переноса. И в коре создается температурное поле.

Величина потока тепла для разных местностей различна. Критерием теплового состояния Земли является поверхностный градиент температур, позволяющий судить о температурных перепадах в глубине Земли и о потерях тепла. С увеличением глубины температура грунта возрастает в соответствии с геотермическим градиентом (примерно 3°С на каждые 100 м). На любой глубине температура горных пород определяется по формуле (1)

$$t = t_0 + (H - H_0) / \sigma \quad (1)$$

где H_0 – глубина залегания слоя постоянной температуры, м;

t_0 – температура пород на глубине H_0 , °С;

H – глубина для которой определяется температура, м;

σ – геотермическая ступень, м/град [5, 8, 13-15].

Бесконечная генерация внутреннего земного тепла компенсирует его внешние потери и служит источником энергонакопления. В зависимости от места расположения источника петрогеотермальной энергии меняется и интенсивность тепла, которое можно из него получить [17]. Согласно прогнозной оценке в верхней 10-километровой толще земной коры недр Украины содержится $6,9 \cdot 10^{22}$ Дж или $2,38 \cdot 10^{12}$ т. у. т., а в верхней 3-километровой толще содержится $3,3 \cdot 10^{22}$ Дж, или $1,12 \cdot 10^{12}$ т. у. т. Таким образом, экономически обоснованными являются системы с глубиной буровой скважины до 3 км.

Перспективность повсеместного освоения этого нового «полезного ископаемого» определяется глобальностью его распространения, но требует научного, экономически обоснованного подхода к технологии его разработки и выполнения геолого-экономической оценки

его ресурсов. С этой целью следует отметить ряд специфических особенностей, определяющих достоинства и недостатки теплоты недр как полезного ископаемого [15].

К основным достоинствам можно отнести:

- повсеместность распространения – вся толща земной коры ниже нейтрального слоя или слоя вечной мерзлоты находится в нагретом состоянии и при самых различных геотермических условиях (даже наихудших), теплота аккумулирована горными породами, и поэтому гипотетически она может быть извлечена в любой точке территории Земли;
- неисчерпаемость – энергетический потенциал нагретых пород лимитируется техническими возможностями глубины бурения скважины;
- приближенность к потребителю – геотермальные циркуляционные системы можно строить непосредственно около потребителя, что с учетом средней дальности транспортировки органического топлива в стране позволит сэкономить на перевозках угля, нефти и газа, а так же снизить затраты на топливо в районах потребления;
- приспособляемость к потребителю – геотермальные циркуляционные системы могут в широком диапазоне удовлетворять требования по тепловым нагрузкам и температурному потенциалу наиболее распространенных пользователей;
- сравнительно низкая капиталоемкость по сравнению разработкой и добычей природного газа, нефти и угля;
- относительно низкая трудоемкость – геотермальные циркуляционные системы после вывода их на эксплуатационный режим могут быть полностью автоматизированы и почти не требуют рабочей силы для обслуживания;
- безотходность – замкнутый цикл циркуляции теплоносителя может обеспечить по сравнению с традиционными способами выработки энергии, особенно на твердом топливе, практически полную защиту окружающей среды.

Однако специфика геотермальных ресурсов включает и ряд недостатков:

- сравнительно низкий температурный потенциал теплоносителя. В общем случае он зависит от геотермических условий района и необходимых затрат на добычу теплоты, которое определяется в основном капиталовложениями в строительство скважин. Экономически целесообразная глубина зоны теплоотбора ограничивается альтернативными затратами на добычу традиционного топлива и составляет 4-6 км, в связи с чем теплоноситель с температурой 80-90 °С может экономично добываться на 70-80 % территории страны, 90-110 °С – на 20-30 %, 110-150 °С – на 5-10 % и более 150 °С – в отдельных районах геотермических аномалий.
- нетранспортабельность – добытая теплота должна быть использована или преобразована в электроэнергию на месте либо вблизи месторождения, так как на строительство теплотрассы нужны значительные капиталовложения, поэтому район теплоэнергетического обеспечения потребителей ограничивается радиусом 10-15км, а в особо благоприятных условиях – до 25-50км.
- невозможность складирования – для аккумуляции добытой теплоты в виде горячей воды необходимо строительство гигантских емкостей, техническая и экономическая оправданность весьма сомнительна, а теплоаккумуляторов, эквивалентных угольным складам или нефте- и газохранилищам, пока нет.
- отсутствие промышленного опыта – построено пока небольшое количество промышленных циркуляционных систем с естественными коллекторами (во Франции), одна опытная промышленная на Ханкальском месторождении и две экспериментальные системы в слабопроницаемых породах (США, Великобритания); этой практики явно не достаточно для широкого освоения петрогеотермальных ресурсов.

Идея извлечения геотермальной энергии твердых горячих пород при их теплообмене с холодной водой, нагнетаемой с земной поверхности на глубокие горизонты, «оформилась» в начале текущего столетия, а разработку глубинных источников тепла начали сравнительно недавно. Наиболее преуспели в этом отношении Америка и Франция. К примеру, в Париже работает девять геотермальных источников.

Первая технологическая схема геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) и сам этот термин были предложены знаменитым ученым и писателем-фантастом акад. В. А. Обручевым в 1920 г. в его повести «Тепловая шахта». По схеме В. А. Обручева ГЦС представляла собой глубокий вертикальный ствол, от которого подобно лучам пройдены 12

квершлагав. Каждый из них заканчивался вертикальным 10-метровым «колодцем» диаметром 2 м, герметически закрытым сверху привинчивающейся крышкой (рис. 1). В «колодцах» кипела вода, поскольку окружающий их гранитный массив имел температуру выше 100°C. Образующийся пар собирался под крышками «колодцев» и оттуда по трубам, проложенным в квершлагах и стволе, поступал в турбины подземной геотермальной электростанции, а конденсат отводился обратно в «колодцы» по другим трубопроводам, замыкавшим контур циркуляционной системы [14]. Предложенная В. А. Обручевым технологическая схема осуществима, хотя и неэкономична. При указанных параметрах теплообменных «колодцев» даже в случае, если температура пород намного превышает 100°C, кипение воды прекратится по мере охлаждения горячего породного массива около стенок «колодцев», ведь их теплообменная поверхность всего около 800 м². Для получения реальной энергопродукции (например, 10 МВт в течение 10 лет) эту поверхность нужно увеличить не менее чем на три порядка. Однако затраты на проходку 12 000 теплообменных «колодцев» с учетом резкого удлинения квершлагав возрастут намного больше, чем в 1000 раз. Такие «астрономические» затраты не окупятся и при значительной мощности ГЦС.

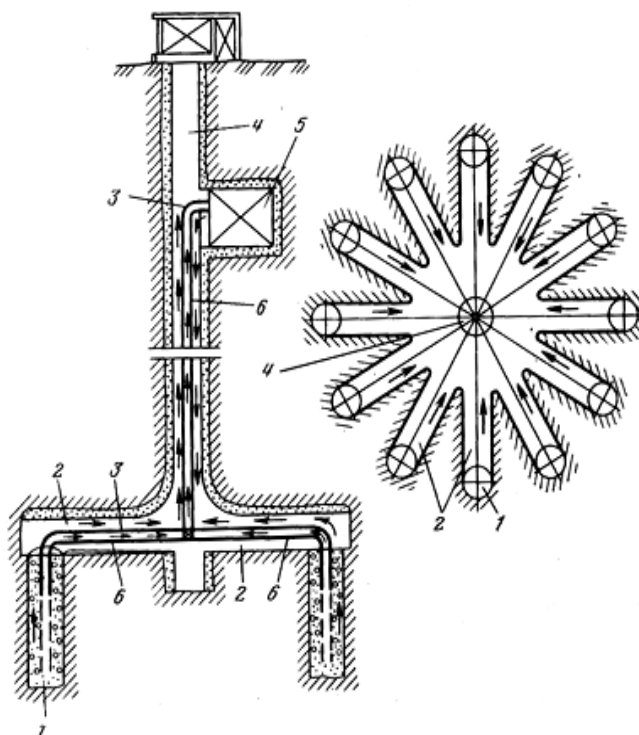


Рисунок 1 – Схема геотермальной циркуляционной системы, описанная в 1920 г. академиком В. А. Обручевым

1 – вертикальный «колодец»; 2 – квершлагаи; 3 – паропроводы; 4 – шахтный ствол; 5 – подземная ГеоТЭС; 6 – трубопроводы конденсата

Разумеется, в предложении В. А. Обручева нужно видеть и оценивать не «технический проект», а перспективную идею извлечения геотермальной энергии горячих пород. В дальнейшем для практической реализации идеи геотермальной циркуляционной системы нужны были экономичные способы использования естественной теплообменной поверхности или создание из глубоких скважин обширной искусственной теплообменной поверхности в массиве горячих пород.

В результате пришли к двум видам систем использования низкопотенциальной тепловой энергии земли [7, 14, 16]:

- открытые системы: в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии используются грунтовые воды, подводимые непосредственно к тепловым насосам;
- замкнутые системы: естественно замкнутые, теплообменники расположены в грунтовом массиве, или гидравлически закрытых подземных тепловых котлов, или искусственно создаваемых подземных тепловых котлов; при циркуляции по ним теплоносителя с

пониженной относительно грунта температурой происходит «отбор» тепловой энергии от грунта и перенос ее к испарителю теплового насоса.

В открытых системах посредством скважин из водоносных слоев грунта добывается горячая вода, которая поступает на отопление домов [17, 18]. К недостаткам этой технологии следует отнести то, что воду, отдавшую тепло, нельзя сливать на поверхность земли или сбрасывать в реку, так как она с большим количеством солей и различных примесей. Поэтому обычно для этого устраиваются парные скважины, чтобы затем возвращать воду обратно в те же водоносные слои.

Главные требования к грунту и грунтовым водам следующие: достаточная водопроницаемость грунта, позволяющая пополняться запасам воды, и хороший химический состав грунтовых вод (например, низкое железосодержание), позволяющий избежать проблем, связанных с образованием отложений на стенках труб и коррозией.

Достоинством открытых систем является возможность получения большого количества тепловой энергии при относительно низких затратах. Однако скважины требуют обслуживания. Кроме этого, использование таких систем возможно не во всех местностях.

Вторую группу систем извлечения теплоты образуют системы с техногенными (нагнетаемыми на рабочий горизонт с земной поверхности) теплоносителями. Одной из таких систем идея замкнутого контура – была предложена в 1963 г. академиками АН УССР А.Н.Щербанем и О.А.Кремневым [18-20]. Нагрев теплоносителя в этой системе производится в естественных или искусственных породах – теплообменниках. Аналогично естественным искусственные теплообменники (геотермальные котлы) представляют собой участки массива горных пород с повышенной температурой, в которых искусственно, например взрывом, созданы полости, трещины и поры, создающие достаточно большую теплообменную поверхность и обеспечивающие проницаемость подвижного теплоносителя. Циркуляция теплоносителя, в качестве которого используется, как правило, вода, осуществляется через систему нагнетательных и эксплуатационных скважин расположенных на расстоянии 300 метров на одной и той же глубине. Впервые этот метод был применен во Франции. Он так и назывался «украинский способ получения геотермальной энергии».

Циркуляционная система извлечения тепла Земли [16, 19, 20] состоит из следующих основных элементов (рис. 2): нагнетательных скважин 1, подземного котла 2, включающего зону естественной или искусственно созданной проницаемости 3, эксплуатационных скважин 4 и поверхностного комплекса, состоящего из установки для очистки теплоносителя 5, промежуточного теплообменника 6 и насосной установки 7.

Нагнетаемая по скважине 1 холодная вода нагревается при фильтрации в зоне проницаемости за счет нестационарного теплообмена с кусками разрушенных трещинами пород и кондуктивного теплового потока из непроницаемого массива, а затем выводится на поверхность по скважине 4 и используется в качестве рабочего теплоносителя или отдает ему тепло в промежуточном теплообменнике 6.

Теплоноситель нагревается за счет охлаждения как разрушенных пород, так и массива, окружающего зону фильтрации. При этом долю глубинного теплового потока в общем количестве вынесенного водой тепла можно считать пренебрежимо малой, несмотря на существенное увеличение его плотности.

Замкнутые системы делятся на горизонтальные и вертикальные. Горизонтальный грунтовой теплообменник устраивается, как правило, рядом с домом на небольшой глубине (но ниже уровня промерзания грунта в зимнее время). Использование горизонтальных грунтовых теплообменников ограничено размерами имеющейся площадки.

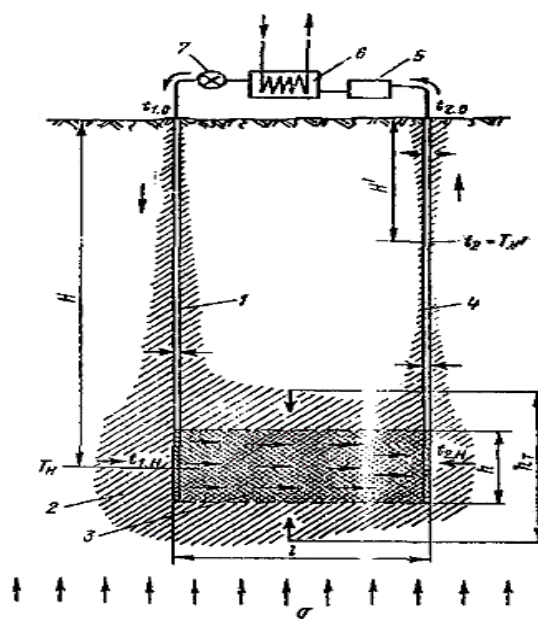


Рисунок 2 – Циркуляционная система извлечения тепла Земли

В странах Западной и Центральной Европы горизонтальные грунтовые теплообменники обычно представляют собой отдельные трубы [15-17], положенные относительно плотно и соединенные между собой последовательно или параллельно. Для экономии площади были разработаны усовершенствованные типы теплообменников, например теплообменники в форме спирали, расположенной горизонтально или вертикально.

Если система с горизонтальными теплообменниками используется только для получения тепла, ее нормальное функционирование возможно только при условии достаточных теплоступлений с поверхности земли за счет солнечной радиации. По этой причине поверхность выше теплообменников должна быть подвержена воздействию солнечных лучей.

Вертикальные грунтовые теплообменники позволяют использовать низкопотенциальную тепловую энергию грунтового массива, лежащего ниже «нейтральной зоны». Системы с вертикальными грунтовыми теплообменниками не требуют участков большой площади и не зависят от интенсивности солнечной радиации, падающей на поверхность. Вертикальные грунтовые теплообменники эффективно работают практически во всех видах геологических сред, за исключением грунтов с низкой теплопроводностью.

Существуют системы использования низкопотенциального тепла земли, которые нельзя однозначно отнести к открытым или замкнутым. Например, одна и та же глубокая (глубиной от 100 до 450 м) скважина, заполненная водой, может быть как эксплуатационной, так и нагнетательной. Диаметр скважины обычно составляет 15 см. В нижнюю часть скважины помещается насос, посредством которого вода из скважины подается к испарителям теплового насоса. Обратная вода возвращается в верхнюю часть водяного столба в ту же скважину. Происходит постоянная подпитка скважины грунтовыми водами, и открытая система работает подобно замкнутой.

Оценка экономической эффективности представляет собой сложную задачу, так как требуется выполнение целого комплекса инженерно-физических расчетов по обоснованию многочисленных взаимосвязанных параметров и режимов эксплуатации такой системы. При этом наиболее важной проблемой является определение температуры теплоносителя при его циркуляции по скважинам и фильтрации в подземном котле.

Неоднородность и анизотропность пород, непостоянство теплофизических свойств и возможность колебаний по времени начальной температуры и расхода поступающей в систему воды, плотности, теплоемкости, теплопроводности, неоднородного породного массива, нестационарный характер процессов теплообмена в скважине и окружающем ее массиве, а также непредсказуемость подземных потоков воды, которые могут принимать участие в процессе, и исключают возможность использовать для ее решения какие-либо известные инженерно-физические расчетные методы [21, 22]. Моделирование такой многокомпонентной системы представляет собой чрезвычайно сложную в задачку с точки зрения её постановки и

математического описания влияющих факторов и строгое решение такой сопряженной задачи нестационарного теплообмена затруднено.

Для оценки эффективности использования глубинного тепла Земли предлагается рассмотреть процесс извлечения в более простой постановке. Схема исследования состоит из герметичного теплообменника типа «труба в трубе»: вода поступает в скважину по обсадной трубе и получает тепло от сухого слоя породы. Нагретая вода поднимается вверх по внутренней трубе и подается потребителю. Предлагаемая схема экологически чистая.

Принимаемые в дальнейшем ограничения не изменяют протекающий процесс подъема тепла и постепенное «снятие» тепла с твердых пород будет только уточнять подъем тепла. Для приближенного решения этой задачи используем численный конечно-разностный метод с использованием разностных схем [23-25]. Анализ решения даст возможность определить эффективность использования такого источника энергии.

Используя конечно-разностный метод анализа уравнения энергии, уравнения Фурье, уравнения Навье-Стокса и уравнения сплошности, мы получим картину распределения температур теплоносителя на различных участках теплообменника либо в подъемных или опускных трубах. После этого сможем судить о скорости передачи геотермального тепла и его количестве.

Метод конечных разностей заключается в дискретизации вышеупомянутых дифференциальных уравнений по контрольным объемам, на которые разбивается исследуемая область. То есть область непрерывного изменения аргументов заменяется конечным, дискретным множеством узлов, называемых сеткой. Вместо искомой функции непрерывных аргументов ведётся поиск функции дискретных аргументов, определяемой в узлах сетки – сеточной функции. Производные, входящие в дифференциальное уравнение, заменяются (аппроксимируются) соответствующими разностными соотношениями. Таким образом, дифференциальные уравнения заменяются системой алгебраических уравнений. Краевые (начальное и граничные) условия также заменяются соответствующими разностными условиями для сеточной функции.

Совокупность правил написания разностных уравнений и краевых условий, выраженных в разностной форме, можно назвать разностной схемой, а узлы, задействованные в ней – шаблоном. Набор узлов, соответствующих фиксированному моменту времени, называют временным слоем.

Получаемое решение разностной задачи будет приближенным решением исходной задачи. Очевидно, что переход к дискретным аргументам подразумевает стремление разностной задачи к исходной при измельчении сетки. В этом случае схема должна гарантировать и сходимости получаемого решения. Замена дифференциальной задачи разностной заранее предусматривает введение ошибки – погрешности аппроксимации. Она характеризуется величиной невязки, получаемой при подстановке точного решения исходной задачи в разностную.

Таким образом, применяя этот метод к системе уравнений тепло- и массопереноса, мы получим реальные состояния теплоносителя, находящегося в условиях нагрева земным теплом, а следовательно, и оценить экономичность той или иной установки, содержащей такой теплообменник.

Библиографический список:

1. Товажнянский Л.Л. Проблемы энергетики на рубеже XXI столетия. Учебное пособие для вузов. – Харьков: НТУ ХПИ, 2004. – 174 с.
2. Баланчевадзе В.И., Барановский А.И. Под ред. А.Ф. Дьякова. Энергетика сегодня и завтра. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 344 с.
3. Кононов Ю.Д. Энергетика и экономика. Проблемы перехода к новым источникам энергии. – М.: Наука, 1981. – 190 с.
4. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. Учебник для вузов. – М.: ИНФРА, 2006. – 278 с.
5. Калинин Ю.Я., Дубинин А.Б. Нетрадиционные способы получения энергии. – Саратов: СПИ, 1983. – 70 с.
6. Дворов И.М., Дворов В.И. Освоение внутриземного тепла. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
7. Берман Э. Геотермальная энергия. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
8. Изучение и использование глубинного тепла Земли. Сборник статей. Ред. коллегия Макаренко Ф.А. и др.–М.: Наука, 1973.–316 с.
9. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр.–Ленинград: Недра, 1986.–178 с.

10. Кутас Р.И. Бевзюк М.И. Земной тепловой поток Донбасса // Геофиз. журн. – 1992. – 14, №2 – С. 14-22.
11. Гордиенко В.В., Завгородняя О.В., Усенко О.В. Тепловой поток Донецкого бассейна // Геофиз. журн. – 1999. – № 1. – С. 127-130.
12. Усенко О.В. Тепловой поток и современная активизация Донецкого бассейна (по новым данным) // Геофиз. журн. – 2002. – 24, № 5. – С. 102-111.
13. Васильев Г.П., Шилкин Н.В. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонаносных системах // АВОК – 2003, № 2.
14. Дядькин Ю.Д., Парийский Ю.М. Извлечение и использование тепла Земли: Учебное пособие. – Ленинград: ЛПИ, 1977. – 113 с.
15. Богусловский Э.И. Техничко-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр. – Ленинград: Изд-в ЛГУ, 1984. – 167 с.
16. Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений. – М.: Недра, 1989. – 228 с.
17. Назаров С.Н. Об одном способе использования глубинного тепла Земли. В кн.: Геотермические исследования и использование тепла Земли. – Ленинград: Наука, 1966.
18. Тело Земли и его извлечение. /Под ред. А.Н. Щербань. – Киев: Наук. думка, 1974. – 263 с.
19. Дядькин Ю.Д. Теплообмен в глубоких скважинах и зонах фильтрации при извлечении тепла сухих горных пород. – Ленинград: Наука, 1974. – 38 с.
20. Дикий Н.А. Энергоустановки геотермальных электростанций. – К. Выща шк., 1989. – 198 с.
21. Лялько В.И., Митник М.М. Исследование процессов переноса тепла и вещества в земной коре. – Киев: Наук. думка, 1978. – 150 с.
22. Любимова Е.А. Численные модели тепловых полей Земли. – М.: Наука, 1983. – 125 с.
23. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. – М. Наука, 1971.
24. Магомедов К.М., Холодов А.С. Сеточно-характеристические численные методы. – М.: Наука, 1988. – 286 с.
25. Патанкар С.В. численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах: Пер. с англ. / Под ред. Г.Г. Янькова. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.