

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202190529 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2021.06.08

(51) Int. Cl. *F24T 50/00* (2018.01)  
*E21B 47/07* (2012.01)

(22) Дата подачи заявки  
2019.07.25

(54) СПОСОБ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИН

(31) 62/717,849

(72) Изобретатель:

(32) 2018.08.12

Кейрнс Пол, Тоуз Мэттью, Редферн  
Джон (СА)

(33) US

(86) PCT/CA2019/000111

(74) Представитель:

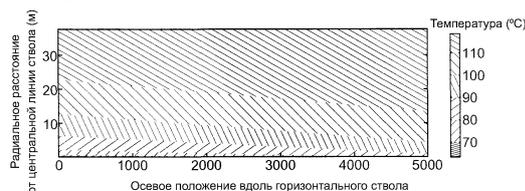
(87) WO 2020/034024 2020.02.20

Вашина Г.М. (RU)

(71) Заявитель:

ИВОР ТЕКНОЛОДЖИЗ ИНК. (СА)

(57) Предложен способ контроля температурных максимумов и минимумов в горизонтальных стволах геотермальных скважинных систем от "пятки" до "носка". Способ включает расположение по меньшей мере двух составляющих пару скважинных систем близко друг к другу так, чтобы был обеспечен термический контакт. Осуществляют циркуляцию рабочей текучей среды, при этом направления ее протекания в этой паре скважинных систем являются встречными. При таком решении достигается температурное уравновешивание со сглаживанием максимумов и минимумов температуры, что приводит к получению более однородного температурного поля между соответствующими стволами скважинных систем и породой геологической формации между ними. Раскрыт конкретный рабочий протокол, относящийся к контролю температуры для максимизации извлечения геотермальной энергии.



A1

202190529

202190529

A1

## СПОСОБ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИН

5 Область техники, к которой относится предлагаемое изобретение

[0001] Предлагаемое изобретение относится в целом к регулированию извлеченной тепловой энергии, в частности, к регулированию рассеивания тепла и эффективному извлечению энергии с помощью геотермальных скважин  
10 и к оптимизации проектирования и эксплуатации систем геотермальных скважин с замкнутым контуром.

Предпосылки создания предлагаемого изобретения

15

[0002] В настоящее время мировым лидером в области геотермальной энергетики являются США: работающие геотермальные системы мощностью более 3300 МВт имеются в восьми штатах. Большинство из них находятся в Калифорнии.

20

[0003] Как известно, геотермальная энергия в виде тепла непрерывно генерируется в слоях магмы в процессе радиоактивного распада. Сообщается, что в слое земной коры толщиной 10000 м содержится в 50000 раз больше тепла, чем во всех нефтегазовых ресурсах планеты. Ясно, что этот факт  
25 привлекает повышенный интерес сообщества энергетиков.

[0004] На таких глубинах, как сообщается, возникают проблемы, связанные с вредным действием высоких температур на оборудование. В некоторых случаях эту проблему удастся смягчить или смириться с нею.

30

[0005] В производстве геотермальной энергии одним из ключевых пунктов является регулирование потерь тепла в скважине и, таким образом, возможность добывать тепло с помощью рабочей текучей среды, используемой как средство извлечения и переноса тепловой энергии.

35

[0006] В уровне техники имеются достижения по этой части, как свидетельствуют документы, о которых говорится ниже.

[0007] В патенте США № 5,515,679, выданном 14 мая 1996 года на имя Шульман (Shulman), заявлен способ добычи геотермального тепла и использования извлеченной энергии. Система включает сеть скважин, рассредоточенных в геологической формации. Предусмотрены различные комплексы скважин, в которых рассредоточены скважины. Этот документ ничего не сообщает о рассеивании тепла по длине стволов скважин.

[0008] В патенте США № 9,556,856, выданном 31 января 2017 года на имя Стюарт и др. (Stewart et al.), раскрыта геотермальная энергетическая система и способ ее работы. В описании изобретения со ссылками на фиг. 15 утверждается следующее.

[0009] «Внутренняя колонна 304 отцентрирована во внешней обсадной колонне 302 с помощью планок 318 центратора, расположенных с интервалами вдоль колонны 304, и на коротком расстоянии над разделительной цементирующей пробкой 314 оставлена консольной, обеспечивая эффективный замкнутый контур для циркуляции рабочей текучей среды (на основе воды), которая служит средой переноса тепловой энергии. Планки 318 центратора работают также как механический турбулизатор, обеспечивающий гидродинамические характеристики в кольцевом пространстве 320 скважинного теплообменника между внешней обсадной колонной 302 и внутренней колонной 304, которые умеренно повышают перенос геотермальной энергии к подземным пластам или от подземных пластов, при сведенных к минимуму потерях давления. Обычно рабочую текучую среду качают вниз по кольцевому пространству 320 (стрелка А) и обратно по внутренней колонне 304 (стрелка В) к поверхности под управлением наземного управляющего модуля, хотя при точном применении для достижения оптимальной производительности направление циркуляции в некоторых случаях может быть сделано обратным».

[0010] В приведенном выше отрывке говорится об изменении направления течения рабочей текучей среды на обратное внутри одной скважины, но не предлагается какого-либо механизма для регулирования температурного профиля внутри пласта, в котором добывают термальную энергию.

[0011] В публикации «*Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission in a horizontal well*» («Добыча геотермальной энергии из сухих горячих пород путем рециркуляционного теплообмена в горизонтальной скважине») в «Energy» № 128 (2017 год), страницы 366-377, за авторством 5 Годун и др. (Guodong et al.) делается вывод, что теплообмен между горизонтальными сегментами скважины с замкнутым контуром повышается при использовании определенных рабочих текучих сред, а увеличение длины горизонтальной скважины и расход закачиваемой текучей среды в 10 подвергающейся термическому воздействию колонне повышает производительность по добыче тепловой энергии, и что выгодно использовать многозабойные горизонтальные сегменты.

[0012] В целом источники уровня техники содержат полезную информацию, но не решают таких проблем, как большая площадь отторженной зоны, присущая 15 многозабойным горизонтальным скважинам, расположение и конфигурация в данном объеме геологической формации для увеличенной добычи тепловой энергии или температурных максимумов и минимумов на протяжении скважины.

[0013] Преодолевая эти недостатки, предлагаемый способ продвигает 20 геотермальную технологию на шаг вперед и уникальным образом сочетает важные типовые процессы для эффективного извлечения тепловой энергии из геотермального градиента независимо, помимо прочего, от качества и вариаций градиента, пористости формации, окружающих условий, географического положения.

25 [0014] В нефтегазовой промышленности хорошо известны технологии бурения разветвленно-горизонтальных скважин, конкретные буровые растворы и т. д., однако простой перенос этих наработок в отрасль добычи геотермальной энергии нереально или невозможно; добыча геотермальной энергии имеет свои 30 трудности. Для создания жизнеспособного протокола следует учесть ряд факторов. Должны быть обеспечены в динамическом режиме, помимо прочего, регулирование термодинамических параметров в процессе извлечения энергии, решение проблем с эксплуатационной пригодностью скважины или с производительностью, реверсированием, изменением направления или

остановкой потока рабочей текучей среды, изменением состава рабочей среды. Унификация в надлежащей последовательности требует анализа, основанного на всесторонней оценке ряда технологий, а без этого поиск решения подобен блужданию в лабиринте.

5

[0015] Это явлено в несметном количестве известных решений, когда приходилось бороться с проблемами бурения, состава рабочих текучих сред, сложной системы теплообмена как в скважине, так и на поверхности, качества и локализации градиента, непрерывных и прерывистых контуров, обсадных труб и прочего.

10

[0016] На фоне современного состояния геотермальных технологий была бы выгода от способа, который пробился бы через отмеченные выше трудности, избегнув их и обеспечив единое решение.

15

[0017] Предлагаемое изобретение обеспечивает эффективные решения насущных проблем до такой степени, что геотермальная энергия может стать с экономической точки зрения ведущим источником энергии.

20

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0018] Одна из целей предлагаемого изобретения состоит в создании способа контроля температурного профиля в породе, окружающей геотермальные скважины.

25

[0019] Еще одной целью предлагаемого изобретения является создание способа максимизации извлечения геотермальной энергии из геологической формации, имеющей температурный градиент, в котором выполняют следующие операции:

30

определяют температурный градиент в пределах массива породы геологической формации,

формируют конфигурацию скважинной системы для локализации и размещения в пределах массива породы, причем конфигурацию скважинной системы основывают на определенном температурном градиенте для

35

максимального извлечения энергии, при этом конфигурация скважинной системы содержит замкнутый контур, имеющий впускную скважину и выпускную

скважину, а также горизонтальный соединительный ствол, обеспечивающий сообщение с возможностью переноса текучей среды, причем упомянутый горизонтальный ствол расположен в пределах упомянутого массива породы, на основании

- 5 конфигурации скважинной системы,  
 температурного градиента и  
 геологического строения формации

выбирают по меньшей мере одну рабочую текучую среду для циркуляции в заданной последовательности внутри системы,

- 10 определяют температуру текучей среды, прошедшей последовательную циркуляцию в скважинной системе, и

для максимального извлечения энергии из массива породы с помощью этой рабочей текучей среды выбирают по меньшей мере одно из следующего:

- 15 изменение направления рабочей текучей среды и ее  
 распределение в сети скважин,  
 состав рабочей текучей среды,  
 расход рабочей текучей среды в сети скважин,  
 направление потока рабочей текучей среды,  
 любое сочетание вышеуказанных выборов.

20

[0020] Передача тепла от породы обратно пропорциональна температуре рабочей текучей среды в скважине. Максимум теплопередачи имеет место у «пятки» впускной скважины, где температура рабочей текучей среды в скважине минимальна. По мере протекания по горизонтальному стволу скважинной системы по направлению к «носку» рабочая текучая среда нагревается. Это показывают данные температурного профиля. Профиль теплопередачи в целом сужается от «пятки» к «носку», достигая минимума у выпускной скважины.

25

- 30 [0021] Было установлено, что различные конфигурации соединенных скважин оказывают на профиль благотворное влияние, обеспечивая повышенное извлечение энергии из данного объема породы и сокращая затраты на создание скважинной системы и «мертвые зоны», где извлечение тепла неэффективно.

- [0022] Было установлено, что похожее на зубчатое зацепление встречно-гребенчатое расположение горизонтальных стволов соседних скважин компенсирует температурные максимумы и минимумы в скважинах. Этот эффект реализуется при соседстве, достаточно близком для термического
- 5 контакта между скважинами. Протекание рабочей текучей среды в соседних скважинах во встречных направлениях способствует температурному уравниванию в геотермальной формации, так как максимум одной скважины нейтрализует или смягчает минимум соседней скважины.
- 10 [0023] Для дальнейшего увеличения извлечения из формации тепловой энергии сеть скважин может быть создана при герметизации скважин во время бурения без использования обсадных труб в горизонтальных стволах. Это явно выгодно экономически и обеспечивает преимущество с точки зрения термодинамики. Это способствует универсальной применимости протокола; конфигурация
- 15 может быть использована как при высокотемпературном, так и при низкотемпературном градиенте в зоне теплопроводности в пределах градиента, в зоне конвекции в пределах градиента, в зоне с высокой проницаемостью в пределах формации и при различных сочетания этих условий.
- 20 [0024] Герметизирующая композиция может включать материалы, повышающие теплопроводность герметизирующего средства. Подходящие для этого композиции можно найти в уровне техники у «Халлибёртон» (Halliburton), «Бейкер Хьюз» (Baker Hughes) и других.
- 25 [0025] Кроме того, в состав рабочей текучей среды могут быть введены добавки, поддерживающие механическую целостность стволов скважинной системы и плотность текучей среды для устойчивости скважин к сжимающим нагрузкам.
- [0026] Для поддержания механической целостности стволов могут
- 30 дополнительно осуществляться вспомогательные типовые механические или химические процессы и их комбинации. Это может быть использование химических твердеющих герметиков и уплотняющих (то есть закупоривающих трещины) добавок, вводимых в скважинную систему в заданных местах при

одной операции и/или последовательности поэтапно выполняемых операций, в зависимости от требований.

[0027] Что касается механических операций, то при необходимости в заданных  
5 местах могут устанавливаться обсадные трубы и/или многоствольные узлы сопряжения.

[0028] Для улучшения термодинамических характеристик, уменьшения или  
устранения паразитной нагрузки насоса и обеспечения возможности создания  
10 более обширных скважинных сетей при поддержании оптимальной пропускной способности в рабочую текучую среду могут вводиться антифрикционные присадки или другие добавки.

[0029] Кроме того, предлагаемый способ позволяет обеспечить достаточные  
15 гидравлические потери напора от трения в каждой горизонтальной секции, чтобы осуществлять пассивный контроль над распределением потоков в горизонтальных секциях скважинной системы.

[0030] Что касается взаимного расположения стволов скважин, то оно может  
20 быть рассредоточенным, углообразным, многоуровневым, конгломератным, встречно-ребенчатым, или сообщающимся, или же оно может совмещать признаки вышеперечисленных типов в зависимости от конкретного массива породы для максимального извлечения энергии. Термическое взаимовлияние или влияние «мертвых зон», как и потенциальную потребность в термальной  
25 подпитке отдельных стволов, для чего может потребоваться остановка на заданный период времени потока рабочей текучей среды, может быть смягчено также ориентацией.

[0031] Впускные и выпускные скважины разных систем могут быть общими по  
30 меньшей мере для некоторых из соседних систем. Производственный участок также может быть единым, или же могут быть разные производственные участки. Кроме того, замкнутые контуры скважинных систем могут быть устроены выше или ниже поверхностного участка. Это будет зависеть от конкретных обстоятельств.

[0032] После этого общего описания изобретения следует краткое описание прилагаемых графических материалов (чертежей).

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРИЛАГАЕМЫХ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

5

[0033] На фиг. 1 представлен температурный профиль, показывающий температуру в зависимости от радиального расстояния от центральной линии ствола относительно осевого положения вдоль горизонтального ствола.

10

[0034] На фиг. 2 показан радиальный объем породы, разрабатываемый для добычи тепловой энергии, с парой горизонтальных стволов, расположенных на расстоянии друг от друга.

15

[0035] На фиг. 3 представлен тот же вид, что и на фиг. 2, при этом в паре горизонтальных стволов потоки рабочей текучей среды направлены встречно.

20

[0036] На фиг. 4 схематично изображена скважинная система, имеющая совокупность горизонтальных стволов, совместно соединенных с впускной скважиной и с выпускной скважиной.

25

[0037] На фиг. 5 представлен тот же вид, что и на фиг. 4, изображающий скважинную систему встречно-ребенчатого типа согласно одному из вариантов осуществления предлагаемого изобретения.

30

[0038] На фиг. 6 на виде сверху изображен другой вариант осуществления предлагаемого изобретения.

[0039] На фиг. 7 изображена в поперечном сечении скважинная система.

35

[0040] На фиг. 8 изображена в поперечном сечении другая скважинная система.

[0041] На фиг. 9 на виде сверху изображен другой вариант осуществления предлагаемого изобретения.

40

[0042] На фиг. 10 изображено поперечное сечение по линии 9 – 9, обозначенной на фиг. 9.

[0043] На фиг. 11 схематично изображена сеть скважин в пределах геотермального градиента породной формации.

[0044] На фиг. 12 схематично проиллюстрирован порядок циркуляции в  
5 скважинных системах в сети скважин.

[0045] На фиг. 13 изображена блок-схема операций, включенных в протокол.

[0046] На фиг. 14 изображена сеть скважин с замкнутым контуром с наложением  
10 на карту, показывающую распределение пластовой температуры.

[0047] На чертежах сходные ссылочные обозначения относятся к сходным  
элементам.

15

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ  
ПРЕДЛАГАЕМОГО ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0048] На фиг. 1 уклон температуры вдоль оси горизонтальной скважины для  
20 данного массива окружающей породы. Заслуживает внимания тот факт, что  
рабочая текучая среда при ее протекании от «пятки» к «носку» нагревается.  
Передача тепла от породы обратно пропорциональна температуре рабочей  
текучей среды. Соответственно, наибольшая доля тепловой энергии  
извлекается максимально у «пятки» и минимально у «носки». Это явно  
25 ограничивает эффективность, поскольку создаются максимумы и минимумы.

[0049] На фиг. 2 на виде сверху показаны два находящихся на расстоянии друг  
от друга горизонтальных ствола 10 и 12, пробуренных в геотермальной  
формации 14. Стволы 10 и 12 находятся на расстоянии друг от друга, но  
30 остаются в термическом контакте. В рассматриваемом варианте в каждом из  
стволов 10 и 12 направления протекания рабочей текучей среды совпадают  
(показано стрелками). Температурный профиль, о котором было сказано выше  
со ссылками на фиг. 1, показан для каждого из стволов 10 и 12, при этом  
профили являются расходящимися друг от друга и покидают зону 16, «мертвую  
35 зону», из которой не извлекается тепловая энергия в пределах разумного срока.

[0050] На фиг. 3 проиллюстрировано первое решение проблемы извлечения энергии, возникшей в ситуации, проиллюстрированной на фиг. 2. Здесь, как можно видеть, направления протекания рабочей текучей среды в стволах 10 и 12 являются встречными. При таком решении максимумы и минимумы для ствол 5 10 и 12 уравнивают друг друга, и массив породы между стволами 10 и 12 не имеет «мертвых зон» или неразрабатываемых областей, то есть, отсутствует зона 16. Собственно, для данного массива породы, в котором пробурены стволы 10 и 12, может быть разработан большой радиальный объем породы для добычи тепла, иначе говоря, можно извлечь больше тепла на 10 единицу площади. К тому же, стволы расположены ближе друг к другу, что приводит к значительному сокращению расходов на бурение/строительство.

[0051] На фиг. 4 схематично изображена известная система 18 с множественными горизонтальными стволами. Здесь горизонтальные стволы 15 20 – 32 отстоят друг от друга в целом радиально, имея общие впускную скважину 36 и выпускную скважину 38. Здесь длина горизонтальных стволов составляет, например, от 2000 м до 8000 м.

[0052] На фиг. 5 проиллюстрировано встречно-гребенчатое расположение двух 20 скважинных систем 18. Благодаря эффективности решения, обсужденного выше со ссылками на фиг. 3, было установлено, что расположение двух скважинных систем 18 с пространственным отстоянием и в термическом контакте является выгодным, как обсуждалось выше со ссылками на фиг. 3. Вторая скважинная система 18 имеет горизонтальные стволы 38 – 50, которые, 25 подобно тому, как показано на фиг. 4, имеют общие впускную скважину 52 и выпускную скважину 54. При таком решении в парах соседствующих стволов, например, 20 и 38, 22 и 40, 24 и 42 и т. д. рабочая текучая среда в каждом случае протекает во встречных направлениях, благодаря чему достигается результат как в решении, проиллюстрированном на фиг. 3. Должно быть 30 понятно, что это решение существенно повышает плотность размещения стволов в данном объеме породы в геотермальной формации, и поэтому повышает количество тепловой энергии, передаваемой рабочей текучей среде.

[0053] На фиг. 6 изображен другой вариант осуществления предлагаемого изобретения, в котором скважинные системы 18 расположены рядом бок о бок с ориентацией во встречных направлениях. При таком решении первая скважинная система 18 имеет горизонтальные стволы 56, 58 и 60, соединенные с общими впускной скважиной 62 и выпускной скважиной 64. От впускной скважины 62 к выпускной скважине 64 стволы 56, 58 и 60 сходятся, и расстояние между ними изменяется. Рабочая текучая среда протекает в стволах 56, 58 и 60 в направлении от впускной скважины 62 к выпускной скважине 64, как показано стрелкой. Во взаимодействии со стволами 56, 58 и 60 работают горизонтальные стволы 66, 68 и 70, относящиеся ко второй системе. Они имеют общие впускную скважину 72 и выпускную скважину 74. Вторая система устроена так же, как и система со стволами 56, 58 и 60, с тем отличием, что схождение горизонтальных стволов ориентировано в направлении, противоположном тому, которое имеет место в первой системе 18, то есть, рабочая текучая среда протекает от впускной скважины 72 к выпускной скважине 74. Горизонтальный ствол 66 находится на расстоянии от горизонтального ствола 60, но в термической близости к нему. Обе системы 18 посредством стволов 76 и 78 сообщены для обмена текучей среды. Как говорилось выше, это другое решение, обеспечивающее смягчение максимумов и минимумов температурного профиля в массиве породы.

[0054] На фиг. 7 схематично представлено поперечное сечение семи горизонтальных стволов у точки схождения, о чем говорилось выше со ссылками на фиг. 6, вблизи выпускной скважины, при этом пространственное взаимное расположение стволов 82, 84, 86, 88, 90 и 92 показано подобным тому, которое обозначено как расстояние «X», составляющее, например от 20 м до 80 м. Стволы выходят за пределы страницы. На фиг. 8 схематично представлено поперечное сечение семи горизонтальных стволов 82, 84, 86, 88, 90 и 92 у точки расхождения, вблизи впускной скважины, с одинаковым расстоянием «Y» между стволами, например, от 80 м до 120 м.

[0055] Это решение является альтернативным решению, проиллюстрированному на фиг. 5, но оно обеспечивает такую же термическую

выгоду за счет направления протекания рабочей текучей среды и термической близости горизонтальных стволов.

[0056] На фиг. 9 проиллюстрировано решение, альтернативное решению, проиллюстрированному на фиг. 6. Данное решение предусматривает встречно-гребенчатое расположение горизонтальных стволов. В рассматриваемом варианте горизонтальные стволы 94, 96 и 98 имеют общие впускную скважину 100 и выпускную скважину 102 и расходятся в направлении от впускной скважины 100 к выпускной скважине 102. Горизонтальные стволы 94, 96 и 98 имеют взаимное встречно-гребенчатое расположение с горизонтальными стволами 104, 106 и 108. Последние имеют общие впускную скважину 110 и выпускную скважину 112 и расходятся в направлении от выпускной скважины 112 к впускной скважине 110. Для эффективного извлечения энергии расстояния между горизонтальными стволами соблюдаются такие же, как и в примерах, рассмотренных выше. Для обмена текучей средой обе скважинные системы сообщены посредством соединений 114 и 116.

[0057] На фиг. 10 схематично изображено поперечное сечение системы стволов 118, 120 и 122, имеющих сходное пространственное расположение и находящихся в термическом контакте со стволами 124, 126 и 128. Направление протекания рабочей текучей среды в стволах 118, 120 и 122 противоположно тому, которое имеет место в стволах 124, 126 и 128. Расстояние между стволами зависит от ряда факторов.

[0058] На фиг. 11 схематично изображена планируемая сеть скважин, пробуренных в формации с переменным геотермальным градиентом 130. В рассматриваемом варианте, как и в вариантах, рассмотренных выше, скважинные системы горизонтальных стволов обозначены позицией 18, и каждая из них может быть реализована по любому из ранее рассмотренных вариантов. Ссылочные обозначения приведены только для ясности.

[0059] Что касается взаимного расположения скважинных систем в массиве породы, то для максимального извлечения энергии оно может быть выполнено рассредоточенным, углообразным, многоуровневым, конгломератным,

встречно-гребенчатым или сообщающимся. Планируемое расположение реализуют после того, как определены температурный градиент и теплопроводность породы. Гибкость методики повышается еще и тем, что бурение скважин может осуществляться без использования обсадных труб при  
5 одновременном закупоривании трещин в стволах скважин. В некоторых специфических случаях обсадные трубы могут использоваться в определенных местах сети скважин.

[0060] Возможно решение, предусматривающее скважинные системы с  
10 прерывистым замкнутым контуром, имеющие впускную скважину 36 и выпускную скважину 38, а также горизонтальные стволы 20 – 32 (более ясно представлено на фиг. 3), расположенные в пределах градиента 130, и/или системы в сети могут быть соединены между собой общим соединением впускных скважин 36 и выпускных скважин 38. Общие впускные соединения  
15 обозначены позицией 132, а общие выпускные соединения обозначены позицией 134. Кроме того, общие выпускные скважины 134 или обособленные выпускные скважины 38 могут быть объединены в сеть с соседними или близкими скважинами 136. Это показано штриховой линией и обозначено позицией 138.

20 [0061] Градиент может быть высокотемпературным, низкотемпературным, содержать зону теплопроводности, содержать зону конвекции, формация может содержать зону высокой проницаемости, формация может содержать зону низкой проницаемости, а также могут иметь место разные сочетания этих  
25 условий.

[0062] На фиг. 12 схематично проиллюстрирован взаимный обмен рабочей  
текучей средой в сети скважин. При таком решении удастся избежать температурных вариаций. Соответственно, рабочую текучую среду можно в  
30 сети перенаправлять и распределять, состав рабочей текучей среды можно полностью изменять или модифицировать с помощью добавок, можно изменять расход рабочей текучей среды и направление ее протекания, можно делать вышеназванное в разных сочетаниях с целью максимизации извлечения энергии из температурного градиента с помощью рабочей текучей среды. Кроме

того, поток рабочей текучей среды можно полностью останавливать в определенном месте сети из соображений производительности и/или с учетом термических характеристик. Эта процедура также облегчает термальную подпитку скважины или системы скважин.

5

[0063] Возвращаясь к фиг. 11, следует заметить, что скважинные системы 18 с замкнутым контуром могут быть закрыты выше или ниже поверхности S, как показано на указанном чертеже. Это зависит от условий окружающей среды и других факторов, известных специалистам. Оперативное управление подачей

10

текучей среды, текущий контроль температуры, отбор проб текучей среды, управление направлением ее протекания и ее расходом и т. д. для достижения желаемых результатов может осуществляться на поверхности S с позиции 140 с помощью подходящих средств, хорошо известных в отрасли. Извлеченная тепловая энергия может передаваться на преобразователь 142 для

15

распределения и/или храниться в накопительном устройстве 144 для последующего использования. С обеспечением преимущества извлеченная энергия может быть использована для генерации пара, который может быть использован в промышленных процессах. В зависимости от конкретных условий сеть скважин может быть создана вблизи существующего промышленного

20

объекта.

[0064] На фиг. 13 представлен сводный протокол с описанием отдельных шагов (фаз). На фазах 2 – 4 последовательность операций может меняться в зависимости от условий окружающей среды, геологического строения формации, температурного градиента, типа породы, ее изменчивости и других факторов. Задача состоит в ясном изложении протокола с ключевыми операциями, требуемыми для максимизации извлечения тепловой энергии независимо от условий, что является отличительным признаком предлагаемого способа.

25

[0065] На фиг. 14 иллюстрируется, как изложенные выше идеи реализованы в контексте переменного распределения температуры в геологической формации, это распределение показано с помощью изотерм. В соответствии с температурным градиентом и распределением температуры в данной зоне

30

изменяется оптимальная конфигурация сети скважин, расстояние между горизонтальными стволами, направление протекания рабочей текучей среды и ее расход.

5 [0066] Далее рассматривается пример протокола.

[0067] Для оптимизации системы с замкнутым контуром первым делом обычно определяют температурный градиент в разрабатываемой зоне. В седиментационных бассейнах он обычно составляет от  $28^{\circ}\text{C}/\text{км}$  до  $35^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . В 10 седиментационных бассейнах с малой глубиной точки Кюри («тонкая корка») и в зонах с высоким тепловым потоком градиент может достигать  $150^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

[0068] Для создания геотермальных скважинных систем выявляют подходящие зоны. В отличие от традиционных геотермальных технологий, для систем с 15 замкнутым контуром подходит любая порода, так как к ней не предъявляется требований в отношении проницаемости, пористости или особых геологических характеристик. Подходящими зонами могут быть зоны с такими подстилающими породами, как песчаники, сланцевые глины, алевролиты, аргиллиты, доломиты, карбонаты, породы с кристаллическим основанием.

20 [0069] Некоторые зоны предпочтительны для разработки благодаря комбинации распределения температуры, теплопроводности и скорости проходки бурением. Поэтому на следующем этапе используют температурный градиент, чтобы установить распределение температуры в массиве породы, как показано на 25 фиг. 14, где представлена карта изотерм сверху вниз в данной формации. Подходящими являются температуры от  $85^{\circ}\text{C}$  до  $250^{\circ}\text{C}$  или даже  $350^{\circ}\text{C}$ .

[0070] Оценивают распределение теплопроводности в массиве породы. Это может делаться на основе прямых измерений, на основе экстраполяции 30 лабораторных данных, или это распределение можно рассчитать на основе косвенных данных, таких как скорость звука, минералогический состав, тип породы. Теплопроводность может быть в пределах от  $1,7 \text{ Вт}/\text{м К}$  для мягких сланцевых глин до более чем  $4 \text{ Вт}/\text{м К}$  для богатых кварцем песчаников.

[0071] На следующем этапе для разрабатываемой зоны определяют предел прочности при неограниченном сжатии, после чего оценивают скорость проходки бурением, которая сильно зависит от прочности при неограниченном сжатии.

5

[0072] Традиционные геотермальные технологии предусматривают поиск геотермальной зоны, а затем оптимизацию планирования и разработки ресурса. Для систем с замкнутым контуром, в отличие от этого, подходит любая геологическая формация, поэтому выбор разрабатываемой зоны может быть частично обусловлен скоростью проходки бурением. Эта скорость зависит от прочности при неограниченном сжатии, которая обычно составляет от 40 МПа для мягких сланцевых глин до 300 МПа для пород с кристаллическим основанием. Скорость проходки бурением обычно составляет от 5 м/час для твердых пород до 300 м/час для мягких пород.

10

[0073] Рассматривают возможность применения всех механических и химических типовых процессов, поддерживающих механическую целостность стволов скважин в системе с замкнутым контуром. Оптимальное решение в большой степени зависит от типа породы и ее прочности при неограниченном сжатии. Определяют, достаточно ли твердеющих герметиков и/или добавок к рабочей текучей среде, или же требуется применение обсадных труб и/или механических узлов сопряжения, или же нужна какая-либо комбинация из всех этих средств.

15

[0074] Определившись с техзаданием в отношении подземной инфраструктуры, на следующем этапе анализируют зависящий от температуры энергетический профиль, требуемый потребителем. Это может быть профиль термальной энергии, энергии выхолаживания, электрической энергии или их комбинации. Обычно этот профиль меняется в течение суток и в зависимости от времени года. Аналогично в течение суток и на протяжении года изменяются условия окружающей среды на поверхности, и может изменяться и анализироваться контролируемая по времени тарификация.

20

25

30

[0075] Для максимизации извлечения полезной энергии из массива породы проектируют сеть скважин в трех измерениях. С целью минимизации термического взаимовлияния или влияния «мертвых зон», или же зон массива породы, где извлечение энергии неэффективно, в ходе проектирования определяют расстояния между стволами в сети скважин. Оптимальное расстояние зависит от распределения температуры в разрабатываемой зоне, от теплопроводности, от характеристик рабочей текучей среды и ее расхода. Следует учитывать также расходы на бурение. Обычно расстояние между соседними стволами составляет от 20 м до 120 м. В целях оптимизации эксплуатационных характеристик, минимизации взаимовлияния и влияния «мертвых зон» в сети скважин это расстояние может изменяться на протяжении стволов.

[0076] Проект сети скважин должен обеспечивать также достаточные гидравлические потери напора от трения в каждом горизонтальном стволе, чтобы осуществлять пассивный контроль над распределением потоков в разных горизонтальных стволах сети скважин.

[0077] Проект должен учитывать и наземное оборудование, так как выход из наземной инфраструктуры – это просто вход в подземную систему с замкнутым контуром, поэтому построение и эксплуатационные показатели наземного оборудования влияют на построение и характеристики подземного оборудования и наоборот. Например, оптимальное построение подземной сети скважин при тепловом двигателе с температурой на выходе 70°C, будет отличаться от того, которое было бы оптимальным в случае теплового двигателя с температурой на выходе 90°C.

[0078] Состав рабочей текучей среды в сети скважин определяют вместе с ее оптимальным расходом. Состав рабочей текучей среды подбирают из соображений оптимальных термодинамических характеристик, а также с точки зрения поддержания механической целостности ствола. В качестве рабочей текучей среды могут быть использованы вода, сверхкритические среды, углеводороды, охлаждающие среды или другие текучие среды. В качестве добавок, способствующих поддержанию механической целостности ствола,

могут использоваться твердеющие герметики, реагенты, твердотельные  
партикуляты, закупоривающие агенты, материалы для борьбы с поглощением  
рабочей текучей среды, уплотняющие (то есть закупоривающие трещины)  
добавки для поддержания достаточной устойчивости к сжимающим нагрузкам  
5 или любые комбинации вышеперечисленных добавок. Чтобы без нарушения  
гидравлических ограничений или без ущерба для общего термодинамического  
к.п.д. обеспечить возможность построения более обширной сети скважин, в  
рабочую текучую среду могут вводиться антифрикционные присадки.

10 [0079] Рабочая текучая среда циркулирует в сети скважин. Ее расход через сеть  
последовательных скважин обычно составляет от 40 л/с до 200 л/с в водном  
эквиваленте. Если сеть построена с параллельными скважинными контурами  
или с комбинацией параллельных и последовательных скважинных контуров, то  
общий расход соответственно масштабируется.

15 [0080] Из рабочей текучей среды, циркулирующей в сети скважин с замкнутым  
контуром, извлекают тепловую энергию. В целях достижения максимальной  
эффективности поток рабочей среды может перераспределяться в сети  
скважин.

20 [0081] Извлеченную тепловую энергию распределяют, хранят или превращают в  
электрическую. Преобразование энергии из одного вида в другой и ее хранение  
может определяться требованиями конечного потребителя и/или динамической  
тарификацией.

25 [0082] При выполнении операций осуществляют текущий контроль температуры  
рабочей текучей среды и отклонений в ее составе, факультативно могут  
осуществлять также текущий контроль и/или оценку термических профилей  
стволов в сети скважин, а также текущий контроль и/или оценку механической  
30 целостности стволов в сети скважин.

[0083] Операции по оптимизации термодинамических характеристик могут  
выполняться на основе оценок и текущего контроля в реальном времени. Это,  
например, изменение расхода рабочей текучей среды, направления ее  
35 протекания и распределения потока по стволам в сети скважин. Например,

температура рабочей текучей среды на выходе одной части сети может быть выше ожидаемой, в то время как ее температура в другой части сети может быть низкой, – в таком случае расход рабочей текучей среды может быть надлежащим образом скорректирован.

5

[0084] Механическую целостность стволов можно отслеживать, измеряя и исследуя перепады давления в сети скважин, баланс объема (утечка или прирост объема) рабочей текучей среды, изменчивость ее состава и объем и свойства производимых твердых веществ. С помощью добавок к рабочей

10 текучей среде, реагентов, или запуская в циркуляцию текучие шламы, содержащие твердеющие герметики, закупоривающие агенты или материалы для борьбы с поглощением рабочей текучей среды, можно запускать процесс динамического восстановления механической целостности стволов.

15 [0085] Должно быть понятно, что описанные выше типовые операции в согласованном повторяющемся процессе могут выполняться одна за другой, одновременно или смешанным образом.

**ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ**

1. Способ максимизации извлечения геотермальной энергии из геологической формации, имеющей температурный градиент, включающий
- 5 следующие операции:
- определяют температурный градиент в пределах массива породы геологической формации,
- формируют конфигурацию скважинной системы для локализации и размещения в пределах массива породы, причем конфигурацию скважинной
- 10 системы основывают на определенном температурном градиенте для максимального извлечения энергии, при этом конфигурация скважинной системы содержит замкнутый контур, имеющий впускную скважину и выпускную скважину, а также горизонтальный соединительный ствол, обеспечивающий
- 15 в пределах массива породы, сообщение между ними, причем упомянутый горизонтальный ствол расположен на основании
- конфигурации скважинной системы, геотермального градиента и геологического строения формации
- 20 выбирают по меньшей мере одну рабочую текучую среду для циркуляции в заданной последовательности внутри системы,
- определяют температуру текучей среды, прошедшей последовательную циркуляцию в скважинной системе, и
- для максимизации извлечения энергии из упомянутого массива породы с
- 25 помощью этой рабочей текучей среды выбирают по меньшей мере одно из следующего:
- изменение направления рабочей текучей среды и ее распределение в сети скважин,
- 30 состав рабочей текучей среды, расход рабочей текучей среды в сети скважин, направление потока рабочей текучей среды, любое сочетание вышеуказанных выборов.

2. Способ по п.1, в котором сеть скважин создают при герметизации скважин во время бурения без использования обсадных труб в горизонтальных стволах.

5 3. Способ по п.1, в котором упомянутый температурный градиент определяют на основании распределения температуры в пределах массива породы.

10 4. Способ по п.1, в котором дополнительно определяют тип породы и теплопроводность в пределах упомянутого массива породы.

15 5. Способ по п.1, в котором для устойчивости скважин к сжимающим нагрузкам состав рабочей текучей среды выбирают с добавками, способствующими поддержанию механической целостности стволов в сети скважин и плотности рабочей текучей среды.

20 6. Способ по п.1, в котором дополнительно контролируют по меньшей мере одно из следующего: температуру рабочей текучей среды, механическую целостность стволов в сети скважин, термальную подпитку ствола в сети скважин в процессе работы.

25 7. Способ по п.1, в котором для поддержания механической целостности стволов дополнительно осуществляют вспомогательные типовые механические или химические процессы и их комбинации.

8. Способ по п.7, в котором упомянутые вспомогательные типовые механические процессы включают использование обсадных труб и многоствольных узлов сопряжения в заданных местах сети скважин.

30 9. Способ по п.7, в котором упомянутые вспомогательные типовые химические процессы включают использование химических твердеющих герметиков, уплотняющих, то есть закупоривающих трещины добавок и закупоривающих агентов, вводимых в скважинную систему в заданных местах при одной операции и/или последовательности поэтапно выполняемых  
35 операций.

10. Способ по п.1, в котором с целью максимизации извлечения энергии стволы в сети скважин в упомянутом массиве породы располагают по меньшей мере одним из следующих способов: с рассредоточением, под углом друг к другу, по многим уровням, в виде конгломерата, со встречно-ребенчатым расположением, с сообщающимся расположением или же с сочетанием признаков вышеперечисленных типов.

11. Способ по п.10, в котором впускные скважины и выпускные скважины выборочно соединяют в заданных местах в сети скважин в одной или более позиций на поверхности.

12. Способ по п.1, в котором операция формирования конфигурации скважинной системы включает формирование в пределах массива породы геологической формации скважинных систем, имеющих общую впускную скважину и общую выпускную скважину, соединенные со стволами в позиции на поверхности.

13. Способ по п.1, в котором последовательная циркуляция включает изменение расхода рабочей текучей среды, изменение направления ее протекания, остановку течения рабочей текучей среды и комбинации этих операций.

14. Способ по п.1, в котором для определения изменений состава циркулирующей рабочей текучей среды относительно нециркулирующей в определенных местах сети скважин отбирают пробы рабочей текучей среды.

15. Способ по п.14, в котором определяют, отнести ли изменение состава рабочей текучей среды на счет химических или механических факторов.

16. Способ по п.1, в котором конфигурацию скважинной системы формируют по меньшей мере при одном из следующих условий: в высокотемпературном градиенте, в низкотемпературном градиенте, в зоне теплопроводности в градиенте, в зоне конвекции в градиенте, в зоне высокой

проницаемости формации, в зоне низкой проницаемости формации, при различных сочетаниях этих условий.

17. Способ по п.1, в котором контролируют изменение теплового профиля между соседними стволами в скважинной системе, при этом в порядке контроля на основе распределения температуры в пределах упомянутого массива породы выбирают конфигурацию скважинной системы, для уменьшения термального взаимовлияния и неэффективного извлечения тепловой энергии между соседними стволами определяют разделяющее стволы расстояние.

18. Способ по п.17, в котором выполняют следующие операции: для поглощения тепловой энергии из окружающей породы, имеющей температурный градиент, в первую скважину вводят первую рабочую текучую среду для протекания в этой скважине от максимума к минимуму, для поглощения тепловой энергии из окружающей породы во вторую скважину вводят вторую рабочую текучую среду для ее протекания в этой скважине от максимума к минимуму, при этом для достижения в массиве породы вблизи этих скважин температурного уравнивания без тепловых максимумов и минимумов первую рабочую текучую среду и вторую рабочую текучую среду пропускают по скважинам во встречных направлениях.

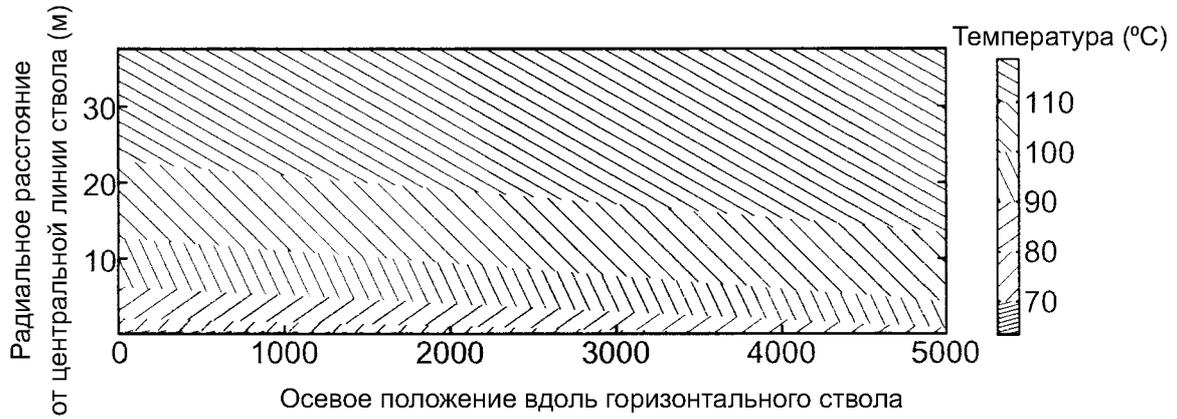
19. Способ по п.1, в котором для использования извлеченной тепловой энергии с упомянутым контуром интегрируют наземное оборудование.

20. Способ по п.19, в котором упомянутое наземное оборудование содержит по меньшей мере одно из следующего: оборудование для генерирования пара для промышленного применения, оборудование для генерирования электрической энергии, оборудование для накопления энергии, распределительная сеть для выборочного распределения энергии по связанным скважинным системам и любые сочетания вышеуказанных видов наземного оборудования.

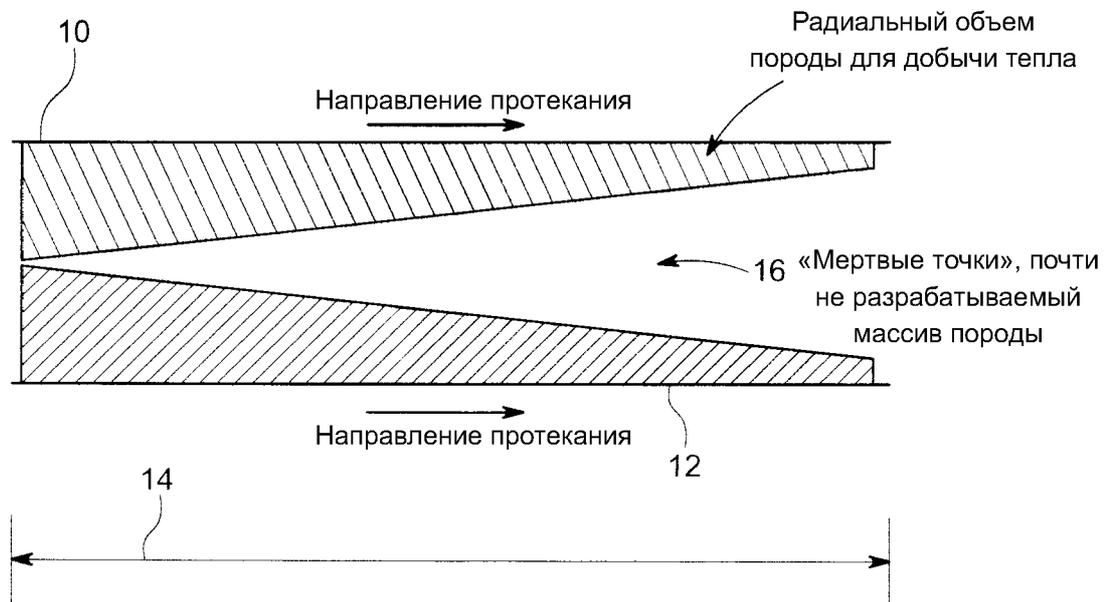
21. Способ по п.1, в котором для создания более обширной скважинной сети при поддержании оптимальной пропускной способности в рабочую текучую среду вводят антифрикционную присадку.
- 5            22. Способ по п.1, в котором обеспечивают достаточные гидравлические потери напора от трения в каждом горизонтальном стволе, чтобы осуществлять пассивный контроль над распределением потоков в горизонтальных стволах скважинной системы.
- 10           23. Способ по п.1, в котором для выбора места расположения скважинной системы относительно разрабатываемого массива породы определяют взаимоотношение между теплопроводностью и скоростью проходки бурением.

Способ контроля температурного  
профиля и извлечения энергии  
с помощью геотермальных скважин

1/9



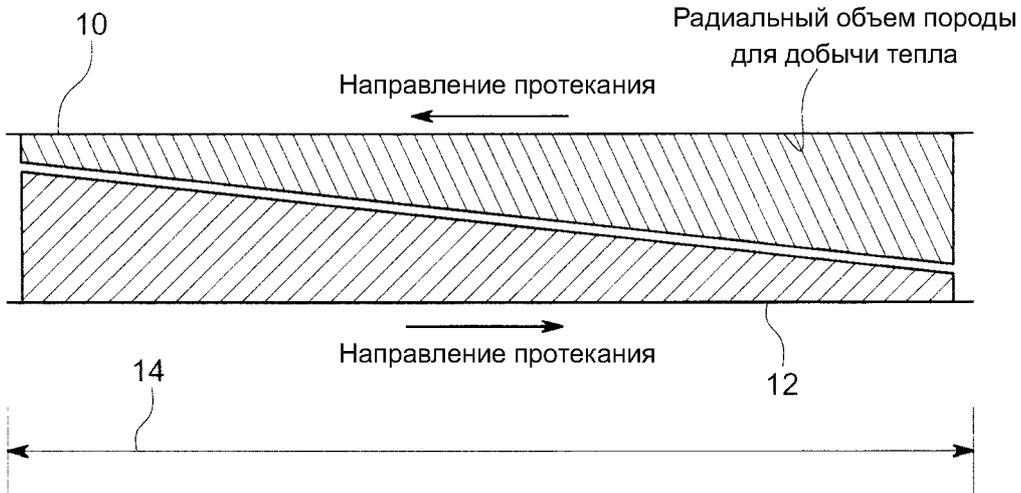
Фиг. 1



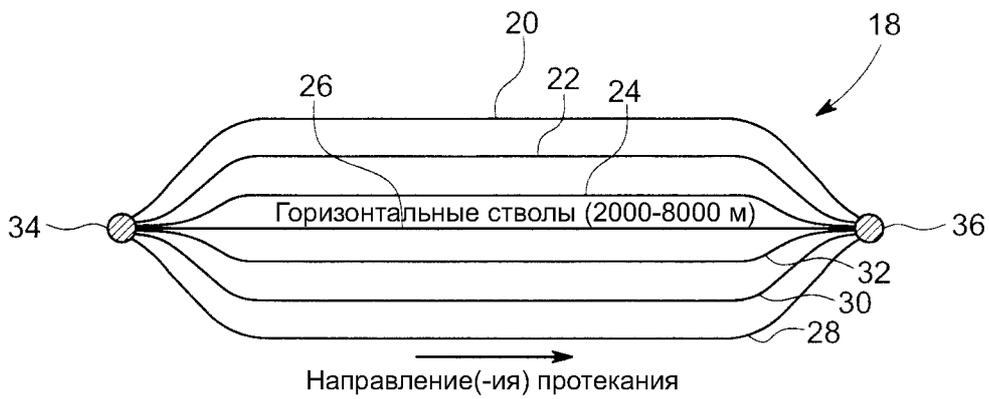
Фиг. 2

Способ контроля температурного профиля и извлечения энергии с помощью геотермальных скважин

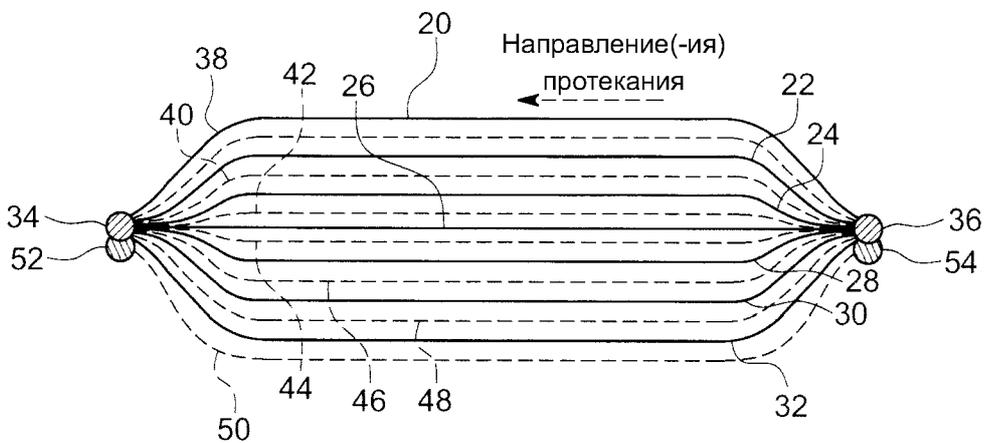
2/9



Фиг. 3



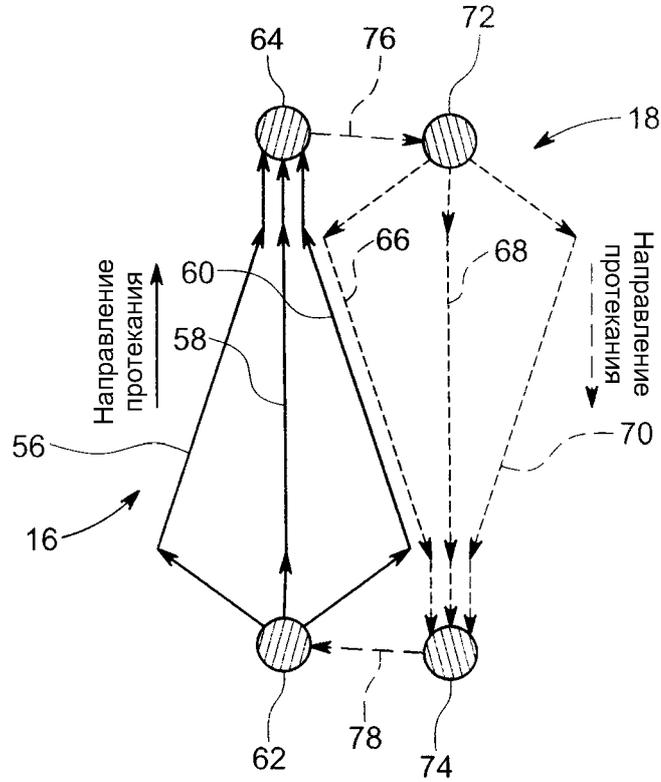
Фиг. 4



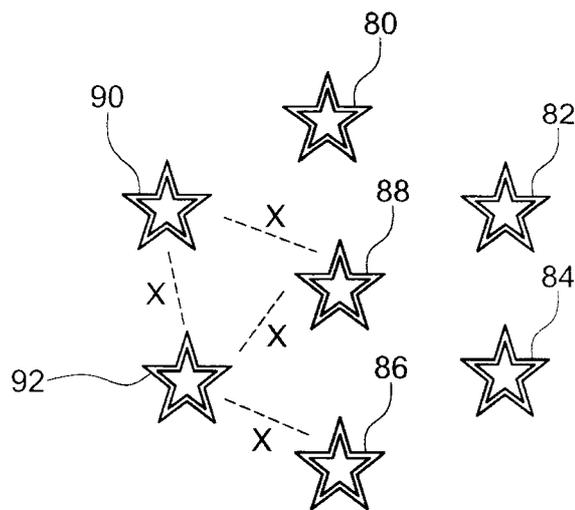
Фиг. 5

Способ контроля температурного профиля и извлечения энергии с помощью геотермальных скважин

3/9



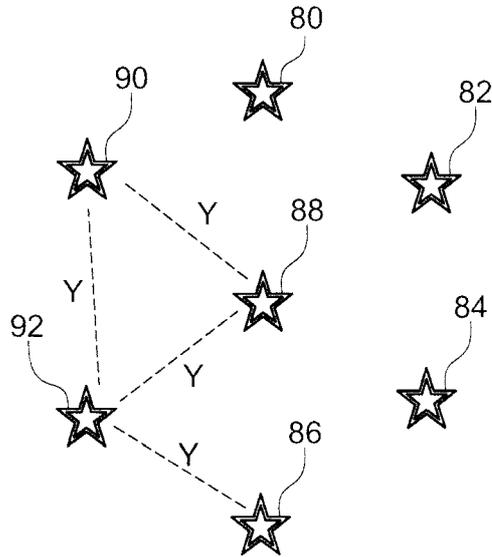
Фиг. 6



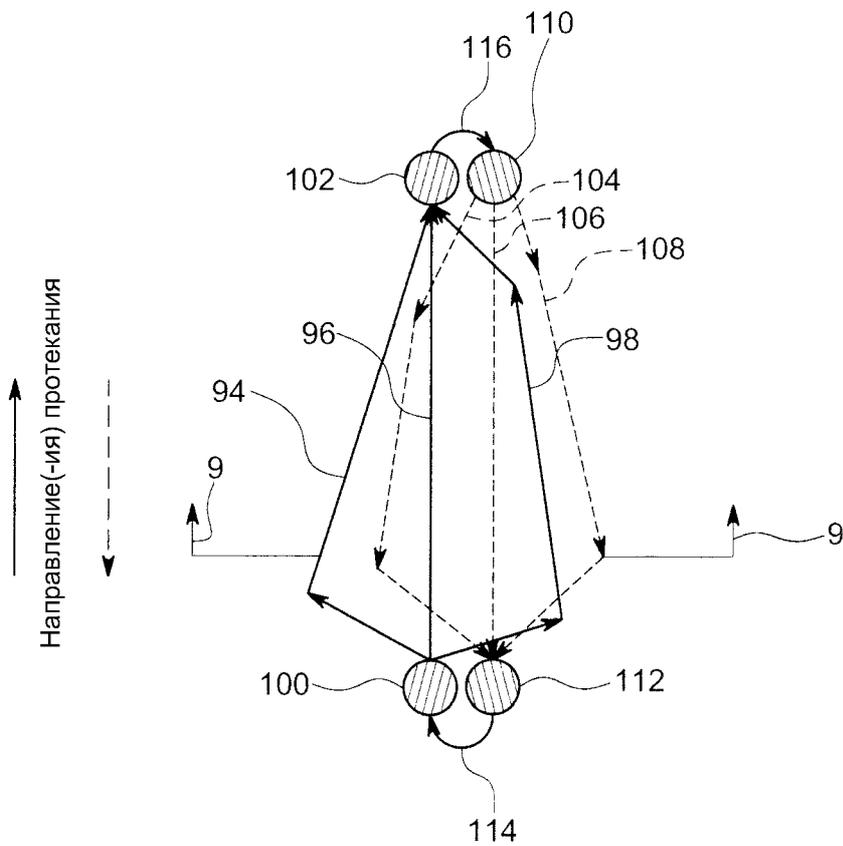
Фиг. 7

Способ контроля температурного  
профиля и извлечения энергии  
с помощью геотермальных скважин

4/9



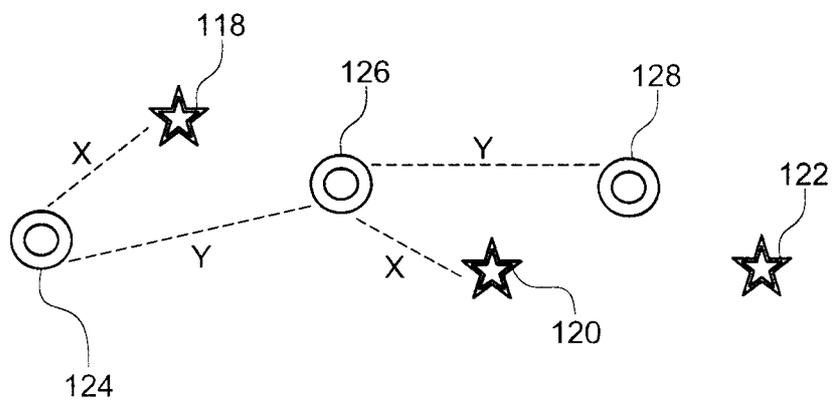
Фиг. 8



Фиг. 9

Способ контроля температурного  
профиля и извлечения энергии  
с помощью геотермальных скважин

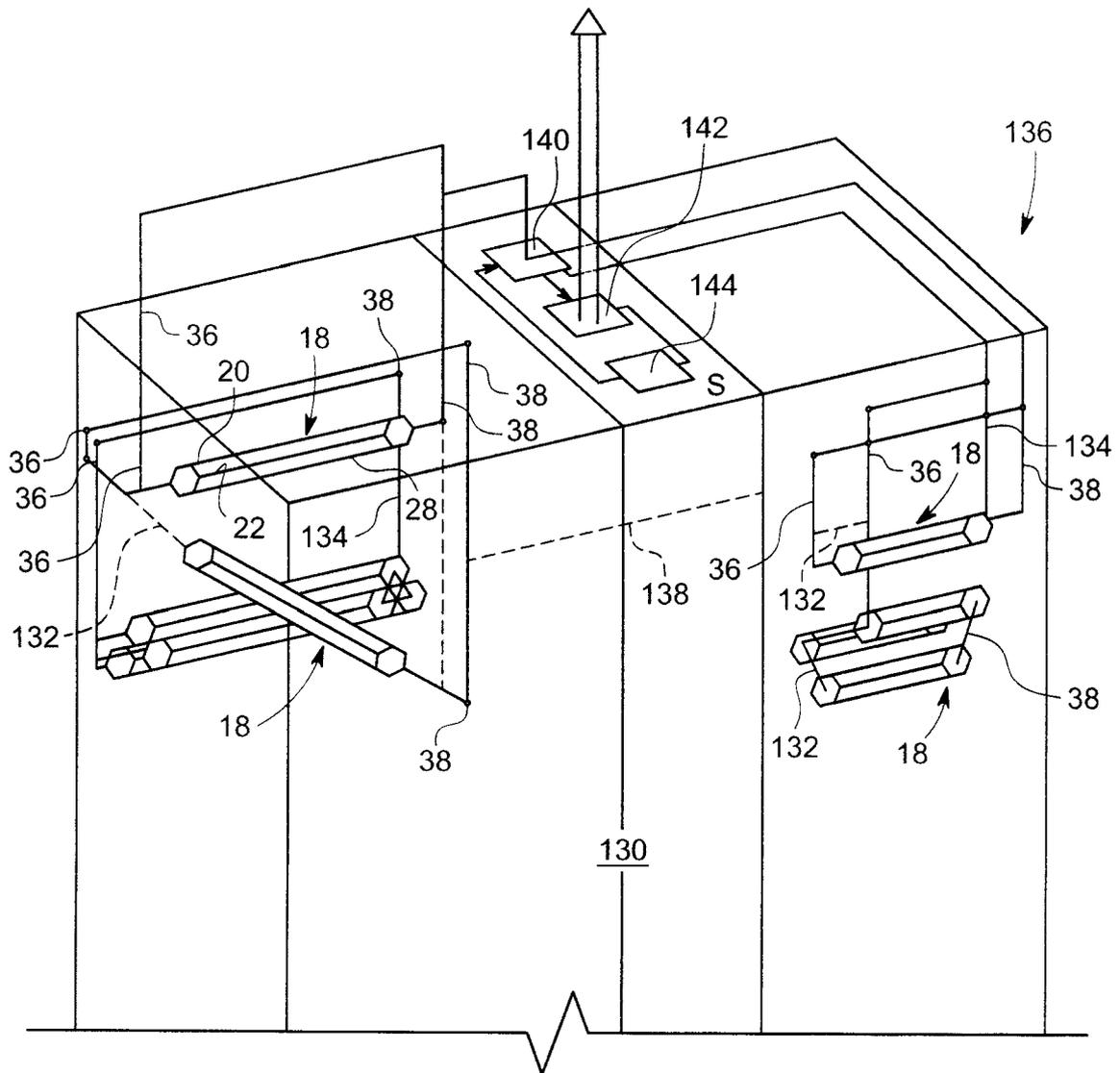
5/9



Фиг. 10

Способ контроля температурного  
профиля и извлечения энергии  
с помощью геотермальных скважин

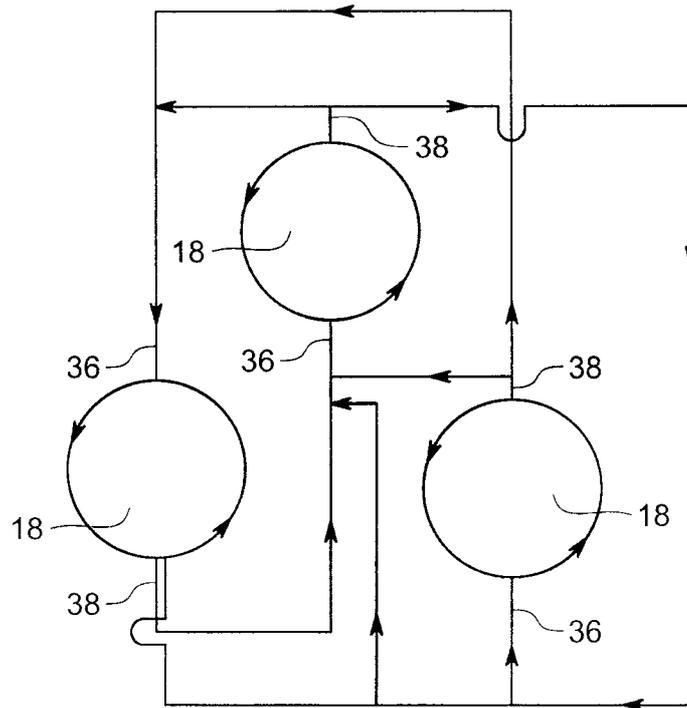
6/9



Фиг. 11

Способ контроля температурного  
профиля и извлечения энергии  
с помощью геотермальных скважин

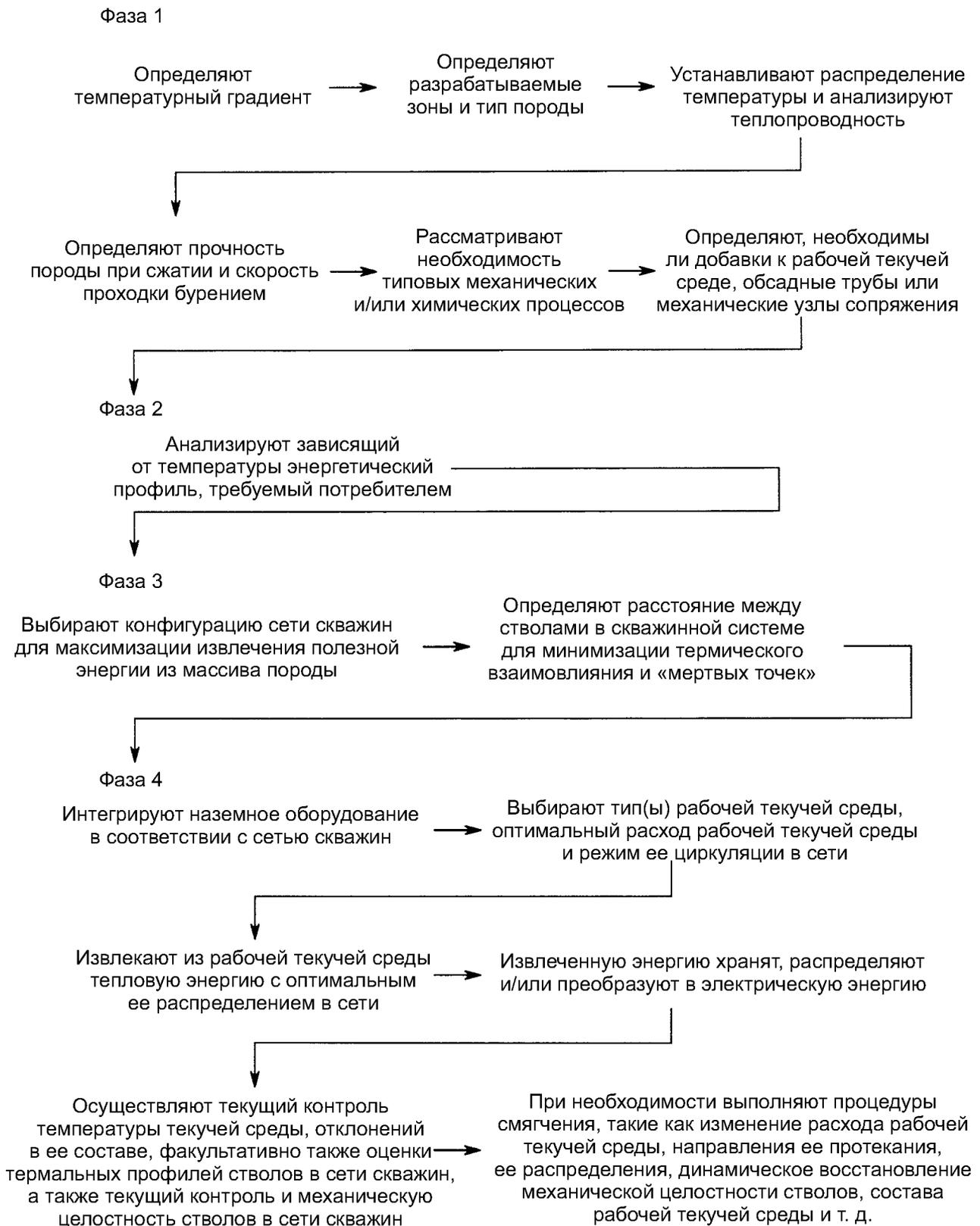
7/9



Фиг. 12

# Способ контроля температурного профиля и извлечения энергии с помощью геотермальных скважин

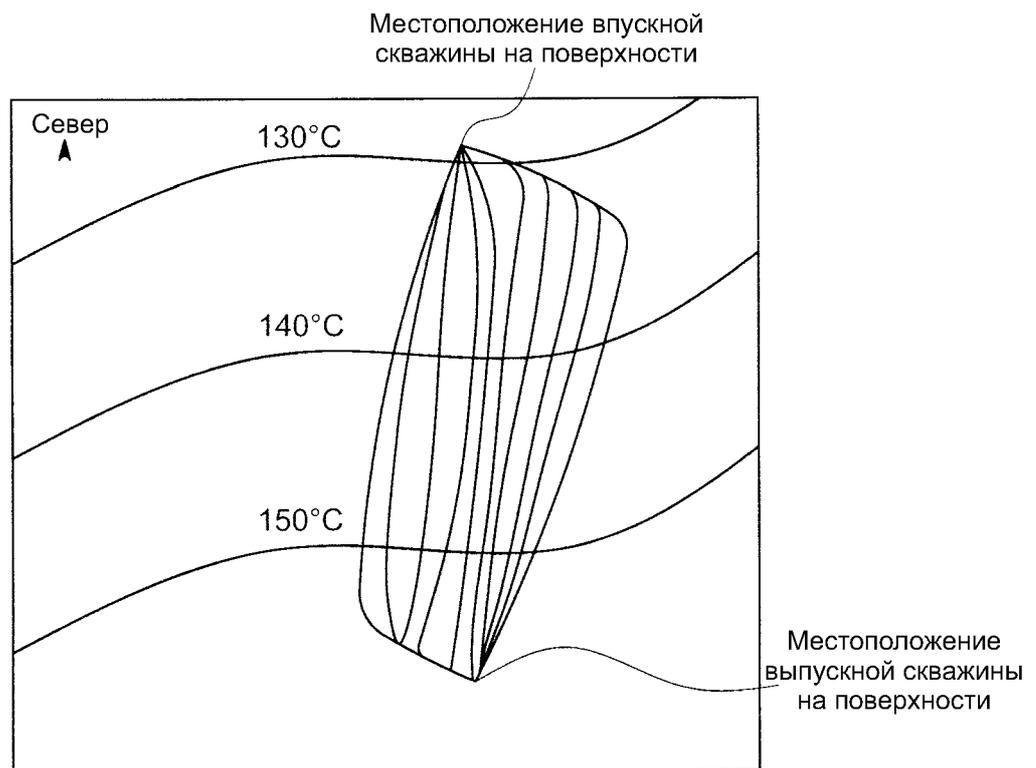
8/9



Фиг. 13

Способ контроля температурного  
профиля и извлечения энергии  
с помощью геотермальных скважин

9/9



Карта распределения температуры  
в разрабатываемой формации с изотермами

Фиг. 14