

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение, в целом, относится к способам и системам для добычи углеводородов, водорода и/или других продуктов из различных подземных пластов, таких как углеводородсодержащие пласты. В частности, некоторые варианты осуществления относятся к использованию циркуляционной системы с замкнутым контуром для нагрева части пласта при проведении процесса конверсии *in situ*.

Уровень техники

Получаемые из подземных пластов углеводороды часто используют в качестве энергетических ресурсов, в качестве сырья и в качестве потребительских продуктов. Озабоченность по поводу истощения имеющихся углеводородных ресурсов и озабоченность по поводу снижения, в целом, качества добываемых углеводородов привели к разработке способов более эффективной добычи, переработки и/или использования имеющихся углеводородных ресурсов. Для извлечения углеводородных материалов из подземных пластов могут быть использованы процессы *in situ*. С целью облегчения извлечения углеводородного материала из подземного пласта может возникнуть необходимость изменения химических и/или физических свойств углеводородного материала в подземном пласте. Химические и физические изменения могут включать в себя реакции *in situ*, которые приводят к образованию удаляемых флюидов, изменению состава, изменениям растворимости, изменениям плотности, фазовым изменениям и/или изменениям вязкости углеводородного материала в пласте. Флюид может быть (не ограничиваясь этим) газом, жидкостью, эмульсией, суспензией и/или потоком твердых частиц, обладающих характеристиками течения, подобными характеристикам потока жидкости.

Как отмечено выше, большие усилия были предприняты для разработки способов и систем для экономичной добычи углеводородов, водорода и/или других продуктов из углеводородсодержащих пластов. Тем не менее, в настоящее время все еще имеется много углеводородсодержащих пластов, из которых углеводороды, водород и/или другие продукты не могут добываться экономичным путем.

В патенте US 4384614 описан способ конверсии нефтяного сланца путем ввода в пласт перегретого воздуха, что приводит к риску возникновения взрыва и нагреву пласта до неконтролируемых температур. Способу, раскрытому в патентной заявке US 2004/0040715, присущи признаки настоящего изобретения, соответствующие ограничительной части п.1 формулы изобретения. В указанном документе описан способ нагрева подземного пласта с помощью нескольких источников тепла, включающих в себя электрические нагреватели и окисляющую текучую среду, которая вводится в пласт. Недостаток известного способа заключается в том, что ввод окисляющей текучей среды в нагретый пласт приводит к риску возникновения взрыва и нагреву пласта до неконтролируемой температуры.

Таким образом, все еще существует необходимость в улучшенных способах и системах для добычи углеводородов, водорода и/или других продуктов из различных углеводородсодержащих пластов.

Раскрытие изобретения

Изобретение предлагает систему конверсии *in situ* для добычи углеводородов из подземного пласта, которая включает в себя множество U-образных скважинных стволов в пласте; систему трубопроводов, размещенную в по меньшей мере двух U-образных скважинных стволах; систему циркуляции текучей среды, соединенную с системой трубопроводов, где система циркуляции текучей среды выполнена таким образом, чтобы горячая теплопереносящая текучая среда циркулировала через по меньшей мере часть системы трубопроводов с целью создания по меньшей мере одной нагретой части пласта; и источник электроэнергии, который выполнен таким образом, чтобы подавать электрический ток в по меньшей мере часть системы трубопроводов, расположенную ниже покрывающего слоя в пласте, для резистивного нагрева по меньшей мере части системы трубопроводов, и при этом тепло переносится от системы трубопроводов к пласту.

Изобретение предлагает также способы применения системы конверсии *in situ* с целью добычи углеводородов из подземного пласта.

В дополнительных вариантах осуществления признаки из каких-либо одних вариантов осуществления могут быть объединены с признаками из других вариантов осуществления. Например, признаки из одного варианта осуществления могут быть объединены с признаками из какого-либо другого варианта осуществления.

В дополнительных вариантах осуществления нагрев подземного пласта производится с использованием любых описанных в заявке способов, систем или нагревателей.

В дополнительных вариантах осуществления к описанным в заявке конкретным вариантам осуществления могут добавляться дополнительные признаки.

Краткое описание чертежей

Преимущества настоящего изобретения могут стать явными для специалистов в данной области благодаря приведенному ниже детальному описанию со ссылками на прилагаемые чертежи, на которых

фиг. 1 иллюстрирует стадии нагрева углеводородсодержащего пласта;

фиг. 2 - схематический вид одного из вариантов осуществления части системы конверсии *in situ* для обработки углеводородсодержащего пласта;

фиг. 3 - схематическое представление системы циркуляции с замкнутым контуром для нагрева части пласта;

фиг. 4 - вид сверху входов в ствол скважины и выходов из части пласта, предназначенного для нагрева с использованием системы циркуляции с замкнутым контуром;

фиг. 5 - вид сбоку одного из вариантов осуществления системы для нагрева пласта, в котором может быть использована система циркуляции с замкнутым контуром и/или электрический нагрев;

фиг. 6 - данные по температурной зависимости электросопротивления сплошного стержня из нержавеющей стали 410 диаметром 2,54 см и длиной 1,8 м при разных величинах подаваемого электрического тока;

фиг. 7 - данные температурной зависимости значений глубины скин-слоя для сплошного стержня из нержавеющей стали 410 диаметром 2,54 см и длиной 1,8 м при разных величинах подаваемого переменного электрического тока;

фиг. 8 - данные зависимости температуры от логарифма времени 2,5 см для сплошного стержня из нержавеющей стали 410 и 2,5 см сплошного стержня из нержавеющей стали 304.

В то время, как изобретение может подвергаться различного рода модифицированию и иметь альтернативные формы, конкретные варианты его осуществления показаны в качестве примеров на чертежах и могут быть описаны в заявке детально. Чертежи могут не быть масштабными. Следует, однако, иметь в виду, что чертежи и их детальное описание не предполагают ограничения изобретения конкретными раскрытыми формами, но, напротив, предполагается охват всех модификаций, эквивалентов и альтернатив в рамках идеи и объема настоящего изобретения, определенных прилагаемой формулой изобретения.

Осуществление изобретения

Приведенное ниже описание относится, в целом, к системам и способам для обработки углеводородов в пластах. Такие пласты могут подвергаться обработке с целью получения углеводородных продуктов, водорода и других продуктов.

«Углеводороды» обычно определяются как молекулы, образованные, главным образом, атомами углерода и водорода. Углеводороды могут также включать в себя другие элементы, такие как (не ограничиваясь ими) галогены, металлические элементы, азот, кислород и/или сера. Углеводородами могут быть (не ограничиваясь этим) кероген, битум, пиробитум, масла, природные минеральные воски и асфальтиты. Углеводороды могут находиться в земле в минеральных матрицах или вблизи от них. Матрицы могут включать в себя (не ограничиваясь этим) осадочную горную породу, пески, силицилиты, карбонаты, диатомиты и другие пористые среды. «Углеводородными флюидами» являются флюиды, которые включают в себя углеводороды. Углеводородные флюиды могут включать в себя или захватывать неуглеводородные флюиды, такие как водород, азот, оксид углерода, диоксид углерода, сероводород, вода и аммиак, или быть захваченными этими флюидами.

«Пласт» включает в себя один или более углеводородсодержащих слоев, один или более неуглеводородных слоев, покрывающий слой и/или основание пласта. «Покрывающий слой» и/или «основание пласта» включают в себя один или более различных типов непроницаемых материалов. Например, покрывающий слой и/или основание пласта могут содержать скальную породу, сланцы, аргиллит и/или влажный/плотный карбонат. В некоторых вариантах осуществления конверсии *in situ* покрывающий слой и/или основание пласта могут включать углеводородсодержащий слой или углеводородсодержащие слои, которые являются относительно непроницаемыми и которые не подвергаются нагреву при проведении конверсии *in situ*, приводящему к значительным характеристическим изменениям углеводородсодержащих слоев покрывающего слоя и/или основания пласта. Основание пласта может, например, содержать сланцы или аргиллит, но в процессе конверсии *in situ* не допускается нагрев основания пласта до температур пиролиза. В некоторых случаях покрывающий слой и/или основание пласта могут быть до известной степени проницаемыми.

«Флюидами пласта» называют текучие среды, присутствующие в пласте и в числе которых могут быть пиролизные флюиды, синтез-газ, подвижный углеводород и вода (водяной пар). В число пластовых флюидов могут входить как углеводородные, так и неуглеводородные флюиды. Выражение «подвижный флюид» относится к флюидам в углеводородсодержащем пласте, которые приобретают способность течь в результате тепловой обработки пласта. «Добываемыми флюидами» называют пластовые флюиды, выводимые из пласта.

«Теплопроводящий флюид» предполагает флюид, который обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух при стандартных температуре и давлении (0°C и 101,325 кПа).

«Тепловым источником» является любая система, обеспечивающая теплом по крайней мере часть пласта, в основном, путем теплопроводности и/или радиационного теплопереноса. В число тепловых источников могут входить электронагреватели, такие как изолированный проводник, удлиненный элемент и/или проводник, находящийся в трубопроводе. Тепловым источником могут быть также системы, генерирующие тепло за счет сжигания топлива вне или внутри пласта. Этими системами могут быть горелки, расположенные вне скважины, скважинные газовые горелки, беспламенные распределенные камеры сгорания и естественные распределенные камеры сгорания. В некоторых вариантах осуществления тепло, создаваемое или генерируемое в одном или более тепловых источниках, может подаваться другими источниками энергии. Эти другие источники энергии могут либо непосредственно нагревать пласт,

либо передавать энергию переносящей среде, которая непосредственно или опосредованно нагревает пласт. Следует принять во внимание, что один или более тепловых источников, которые подают тепло в пласт, могут быть разными источниками энергии. Так, например, для данного пласта некоторые тепловые источники могут подавать тепло от резистивных электронагревателей, некоторые тепловые источники могут подавать тепло за счет сгорания, а некоторые тепловые источники могут подавать тепло от одного или более других источников энергии (например, тепло химических реакций, солнечную энергию, энергию ветра, биомассы или других источников возобновляемой энергии). Химической реакцией может быть экзотермическая химическая реакция (например, реакция окисления). В число тепловых источников может также входить нагреватель, подающий тепло в зону вблизи и/или окружающую место нагрева, такой как нагревательная скважина.

«Способом конверсии *in situ*» называют способ нагрева углеводородсодержащего пласта с помощью тепловых источников с целью подъема температуры по крайней мере части пласта выше температуры пиролиза, в результате чего в пласте образуется пиролизный флюид.

«Нагревателем» является любая система или тепловой источник для генерирования тепла в скважине или вблизи области ствола скважины. Нагревателями могут быть (не ограничиваясь ими) электронагреватели, горелки, камеры сгорания, которые реагируют с материалом в пласте, или материалом, полученным из пласта, и/или с их комбинацией.

«Изолированным проводником» называют любой удлиненный элемент, который способен проводить электричество и который покрыт, полностью или частично, электроизоляционным материалом.

Удлиненным элементом может быть голый металлический нагреватель или открытый металлический нагреватель. «Голым металлом» или «открытым металлом» называют металлы, которые не имеют электроизоляционного слоя, такого как минеральная изоляция, и который предназначен для обеспечения электрической изоляции металла по всему рабочему диапазону температур удлиненного элемента. Голый металл и открытый металл может быть металлом, содержащим ингибитор коррозии, такой как естественно образующийся окисленный слой, принудительно окисленный слой и/или пленка. Голый металл и открытый металл включают в себя и металлы с полимерной или другими типами электроизоляции, которые не способны сохранять электроизоляционные свойства при типичной рабочей температуре удлиненного элемента. Такой материал может помещаться на металл и может термически разрушаться в процессе эксплуатации нагревателя.

«Нагревателем с ограничением температуры» обычно называют нагреватель, который регулирует выход тепла (например, снижает выход тепла) выше конкретной температуры без применения внешних средств управления, таких как регуляторы температуры, регуляторы мощности, выпрямители или другие устройства. Нагревателями с ограничением температуры могут быть резистивные нагреватели, работающие на переменном токе или модулированном (например, прерываемом) постоянном токе.

«Температурой Кюри» называется температура, выше которой ферромагнитный материал теряет все свои ферромагнитные свойства. Помимо потери всех ферромагнитных свойств выше температуры Кюри, ферромагнитный материал начинает терять свои ферромагнитные свойства при пропускании через ферромагнитный материал возрастающего электрического тока.

«Изменяющимся во времени током» называют электрический ток, который создает в ферромагнитном проводнике поток электричества со скин-эффектом и имеет меняющуюся во времени величину. Изменяющийся во времени ток может быть переменным током и модулированным постоянным током.

«Переменным током» называют меняющийся во времени ток, который меняет направление, по существу, по синусоидальному закону. Переменный ток создает в ферромагнитном проводнике скин-эффект.

«Модулированным постоянным током» называют любой, по существу, несинусоидально меняющийся во времени ток, который создает в ферромагнитном проводнике скин-эффект.

«Отношение верхнего предела диапазона регулирования к нижнему» для нагревателя с ограничением температуры представляет собой отношение наиболее высокого значения сопротивления при переменном токе или модулированном постоянном токе ниже температуры Кюри к наиболее низкому значению сопротивления выше температуры Кюри для заданного тока.

В контексте, включающем нагревательные системы, устройства и способы с пониженным выходом тепла, выражение «автоматически» означает, что такие системы, устройства и способы функционируют в определенной степени без использования внешнего управления (например, внешних регуляторов, таких как регулятор с температурным датчиком и контуром обратной связи, пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор или упреждающий регулятор).

Выражение «ствол скважины» обозначает отверстие в пласте, выполненное с помощью бурения или введения трубы в пласт. Ствол скважины может иметь, по существу, круглое поперечное сечение или какую-либо другую форму поперечного сечения. В рамках представлений настоящей заявки выражения «скважина» и «отверстие» в случае их применения к отверстию в пласте могут использоваться на основе взаимозаменяемости с выражением «ствол скважины».

«U-образным стволом скважины» называют ствол скважины, который проходит от первого отверстия в пласте через крайнюю мере часть пласта и выходит наружу через второе отверстие в пласте. В

данном контексте ствол скважины может быть лишь грубо V- или U-образным, принимая во внимание, что «ноги» «U» не обязательно должны быть параллельными одна другой или перпендикулярными «дну» «U» для ствола скважины, который считается «U-образным».

«Пиролиз» означает разрыв химических связей вследствие нагрева. Например, пиролиз может включать в себя превращение какого-либо соединения в одно или более другое вещество только за счет тепла. Тепло может передаваться к какому-либо участку пласта, вызывая в нем пиролиз. В некоторых пластах части пласта и/или другие материалы в пласте могут усиливать пиролиз благодаря своей каталитической активности.

«Пиролизными флюидами» или «продуктами пиролиза» называют флюиды, образующиеся, главным образом, при пиролизе углеводородов. Флюид, образовавшийся в результате реакций пиролиза, может смешиваться с другими флюидами в пласте. Смесь будет рассматриваться как пиролизный флюид или продукт пиролиза. В рамках представлений настоящей заявки «зоной пиролиза» называется объем пласта (например, относительно проницаемого пласта, такого как битумно-песчаный пласт), который подвергается реакции или реагирует с образованием пиролизного флюида.

«Суперпозицией тепла» называют подачу тепла от двух или более тепловых источников в выбранный участок пласта с тем, чтобы тепловые источники оказывали влияние на температуру пласта по крайней мере в одном месте между источниками.

«Теплопроводность» является свойством материала, которое описывает скорость, с которой тепло в стационарном состоянии перетекает между двумя поверхностями материала при заданной разнице температур между этими поверхностями.

«Синтез-газ» представляет собой смесь, включающую водород и оксид углерода. Дополнительными компонентами синтез-газа могут быть вода, диоксид углерода, азот, метан и другие газы. Синтез-газ может генерироваться различными способами из разного сырья. Синтез-газ может использоваться для синтеза широкого ряда соединений.

Общий график процесса

Углеводороды в пластах могут подвергаться разного рода обработке с образованием множества различных продуктов. Фиг. 1 иллюстрирует стадии нагрева углеводородсодержащего пласта. Фиг. 1 приводит также пример зависимости выхода (Y) в баррелях нефтяного эквивалента на 1 т (ось y) пластовых флюидов из пласта от температуры (T) нагретого пласта в градусах Цельсия (ось x).

На первой стадии нагрева происходят десорбция метана и испарение воды. Нагрев пласта на стадии 1 должен производиться по возможности быстро. При начальном нагревании углеводородсодержащего пласта углеводороды в пласте десорбируют адсорбированный метан. Десорбированный метан может добываться из пласта. Если углеводородсодержащий пласт нагревается дальше, вода в углеводородсодержащем пласте испаряется. В некоторых углеводородсодержащих пластах вода может занимать от 10 до 50% объема пор в пласте. В других пластах вода занимает большие или меньшие доли объема пор. Вода, как правило, испаряется в пласте при температуре от 160 до 285°C и абсолютном давлении от 600 до 7000 кПа. В некоторых вариантах осуществления испарившаяся вода приводит к изменению смачиваемости в пласте и/или к повышенному пластовому давлению. Изменения смачиваемости и/или повышенное пластовое давление могут влиять на реакции пиролиза в пласте. В определенных вариантах из пласта добывают испарившуюся воду. В других вариантах осуществления испарившуюся воду используют для экстракции пара и/или перегонки в пласте или вне пласта. Удаление воды из пласта и увеличение в нем объема пор увеличивает в объеме пор пространство для хранения углеводородов.

В некоторых вариантах осуществления после нагрева на первой стадии пласт продолжают нагревать дальше, в результате чего температура в пласте достигает (по крайней мере) начальной температуры пиролиза (такой, как температура на нижнем конце диапазона температур на стадии 2). Углеводороды в пласте могут подвергаться пиролизу на стадии 2. Температурный диапазон пиролиза варьируется в зависимости от типов углеводородов в пласте. Температурный диапазон пиролиза может включать температуры от 250 до 900°C. Температурный диапазон пиролиза для получения желаемых продуктов может составлять лишь часть полного температурного диапазона пиролиза. В некоторых вариантах осуществления температурный диапазон пиролиза для получения целевых продуктов может включать температуры от 250 до 400°C или температуры от 270 до 350°C. Если температуру углеводородов в пласте медленно поднимают в пределах температур от 250 до 400°C, образование продуктов пиролиза может в существенной степени завершиться при достижении температуры 400°C. Для получения целевых продуктов среднюю температуру углеводородов можно поднимать со скоростью менее 5, менее 2, менее 1 или менее 0,5°C в сутки. Нагрев углеводородсодержащего пласта несколькими тепловыми источниками может создавать тепловые градиенты вокруг тепловых источников, которые медленно поднимают температуру углеводородов в пласте в температурном диапазоне пиролиза.

Скорость подъема температуры в пределах температуры пиролиза для целевых продуктов может влиять на качество и количество пластовых флюидов, добываемых из углеводородсодержащего пласта. Медленный подъем температуры в температурном диапазоне пиролиза для целевых продуктов может препятствовать подвижности крупноцепочечных молекул в пласте. Медленный подъем температуры в температурном диапазоне пиролиза для целевых продуктов может ограничивать реакции между подвиж-

ными углеводородами, которые дают нежелательные продукты. Медленный подъем температуры пласта в температурном диапазоне пиролиза для целевых продуктов может позволить получать из пласта высококачественные, обладающие высокой плотностью (в единицах Американского нефтяного института) углеводороды. Медленный подъем температуры пласта в температурном диапазоне пиролиза для целевых продуктов может позволить выводить в качестве углеводородного продукта большое количество содержащихся в пласте углеводородов.

В некоторых вариантах осуществления конверсии *in situ*, вместо того, чтобы медленно поднимать температуру в температурном диапазоне, применяют нагрев части пласта до желаемой температуры. В некоторых вариантах осуществления желаемая температура составляет 300, 325 или 350°C. В качестве желаемой температуры могут быть выбраны и другие температуры. Суперпозиция тепловых источников позволяет устанавливать в пласте желаемую температуру относительно быстро и надежно. Для поддержания пласта при, по существу, желаемой температуре можно регулировать поступление энергии в пласт из тепловых источников. Нагретую часть пласта поддерживают при, по существу, желаемой температуре до уменьшения пиролиза в такой степени, что добыча желаемых пластовых флюидов из пласта становится неэкономичной. Подвергаемые пиролизу части пласта могут включать в себя области, доведенные до диапазона температур пиролиза путем теплопереноса только от одного теплового источника.

В некоторых вариантах осуществления из пласта добывают пластовые флюиды, включающие в себя пиролизные флюиды. По мере повышения температуры пласта количество конденсируемых углеводородов в добываемом пластовом флюиде может снижаться. При высоких температурах пласт может производить, в основном, метан и/или водород. Если углеводородсодержащий пласт нагревают через весь диапазон пиролиза, вблизи верхнего предела диапазона пиролиза пласт может производить лишь небольшое количество водорода. После истощения всего имеющегося водорода пласт, как правило, производит минимальное количество флюида.

После пиролиза углеводородов в пласте может оставаться большое количество углерода и некоторое количество водорода. Значительная часть остающегося в пласте углерода может быть добыта из пласта в виде синтез-газа. Генерация синтез-газа может осуществляться на третьей стадии нагрева, изображенной на фиг. 1. Стадия 3 может включать в себя нагрев углеводородсодержащего пласта до температуры, достаточной для осуществления генерации синтез-газа. Синтез-газ может добываться, например, в диапазоне от примерно 400 до примерно 1200°C, от примерно 500 до примерно 1100°C или от примерно 550 до примерно 1000°C. Температура нагретой части пласта, когда генерирующий синтез-газ флюид поступает в пласт, определяет состав образующегося в пласте синтез-газа. Генерируемый синтез-газ может выводиться из пласта через эксплуатационную скважину или эксплуатационные скважины.

Полное энергосодержание в флюидах, добываемых из углеводородсодержащего пласта, в процессе пиролиза и генерирования синтез-газа может оставаться относительно постоянным. В процессе пиролиза при относительно низких температурах пласта значительную часть добываемого флюида могут составлять конденсируемые углеводороды с высоким энергосодержанием. Однако при более высоких температурах пиролиза содержание конденсируемых углеводородов в пластовом флюиде может быть ниже. Из пласта можно добывать большее количество неконденсируемых пластовых флюидов. При генерировании преимущественно неконденсируемых пластовых флюидов энергосодержание на единицу объема произведенного флюида может несколько снижаться. В процессе генерирования синтез-газа энергосодержание на единицу объема произведенного синтез-газа значительно снижается по сравнению с содержанием энергии в пиролизном флюиде. Однако объем добываемого синтез-газа во многих случаях значительно повышается, компенсируя, тем самым, пониженное энергосодержание.

На фиг. 2 дается схематический вид варианта осуществления части системы конверсии *in situ* для обработки углеводородсодержащего пласта. Система конверсии *in situ* может включать в себя барьерные скважины 208. Барьерные скважины используют для создания барьера вокруг обрабатываемого участка. Барьер препятствует протеканию флюида в и/или из обрабатываемого участка. Барьерными скважинами могут быть (но не ограничиваются этим) обезвоживающие скважины, вакуумные скважины, захватывающие скважины, нагнетающие скважины, растворные скважины, замораживающие скважины и их комбинации. В варианте осуществления, изображенном на фиг. 2, показаны барьерные скважины 208, проходящие лишь вдоль одной стороны тепловых источников 210, но, как правило, барьерные скважины окружают все используемые или планируемые к использованию тепловые источники 210 с целью нагрева обрабатываемого участка пласта.

Тепловые источники 210 помещают по крайней мере в части пласта. Тепловыми источниками 210 могут быть нагреватели, такие как изолированные проводники, проводники в проводящих нагревателях, горелки на поверхности, беспламенные распределенные камеры сгорания и/или естественные распределенные камеры сгорания. Тепловыми источниками 210 могут быть и другие типы нагревателей. Тепловые источники 210 подают тепло для нагрева углеводородов в пласте по крайней мере к части пласта. Энергия может подводиться к тепловым источникам 210 по питающим магистралям 212. Питающие магистрали 212 могут быть структурно различными в зависимости от типа теплового источника или тепловых источников, используемых для нагревания пласта. Питающие магистрали 212 для тепловых источников могут передавать электричество для электронагревателей, могут транспортировать топливо для

камер сгорания или могут транспортировать циркулирующую в пласте теплообменивающую текучую среду.

Эксплуатационные скважины 214 применяют для вывода из пласта пластового флюида. В некоторых вариантах осуществления эксплуатационные скважины 214 могут иметь один или более тепловых источников. Тепловой источник в эксплуатационной скважине может нагревать одну или более частей пласта в эксплуатационной скважине или рядом с ней. Тепловой источник в эксплуатационной скважине может препятствовать конденсации и возврату (рефлюксу) в пласт выведенного из пласта пластового флюида.

Добываемый из эксплуатационных скважин 214 пластовый флюид может транспортироваться по коллекторному трубопроводу 216 к обрабатывающим устройствам 218. Пластовые флюиды могут также добываться из тепловых источников 210. Флюид может, например, добываться из тепловых источников 102 с целью регулирования давления в пласте, примыкающем к тепловым источникам. Флюид, добываемый из тепловых источников 210, может транспортироваться через насосно-компрессорную трубу или систему трубопроводов к коллекторному трубопроводу 216, либо же добываемый флюид может транспортироваться через насосно-компрессорную трубу или систему трубопроводов непосредственно к обрабатывающим устройствам 218. В число обрабатывающих устройств 218 могут входить разделительные установки, реакторные установки, облагораживающие установки, топливные элементы, турбины, емкости для хранения и/или другие системы и установки для переработки добытых пластовых флюидов. Перерабатывающие устройства могут производить транспортное топливо из по крайней мере части добываемых из пласта углеводородов.

В некоторых вариантах осуществления способа конверсии *in situ* для нагрева пласта используется циркуляционная система. В качестве циркуляционной системы может быть циркуляционная система с замкнутым контуром. На фиг. 3 дано схематическое представление системы нагрева пласта с использованием циркуляционной системы. Эта система может использоваться для нагрева углеводородов, которые находятся относительно глубоко в грунте и которые находятся в относительно больших по протяженности пластах. В некоторых вариантах осуществления углеводороды могут находиться на глубине 100, 200, 300 м или ниже относительно поверхности. Циркуляционная система может также использоваться для нагрева углеводородов, которые находятся не столь глубоко в грунте. Углеводороды могут находиться в пластах, простирающихся в длину до 500, 750, 1000 м или более. Такая циркуляционная система может стать экономически жизнеспособной в пластах, в которых длина предназначенного для обработки углеводородсодержащего пласта велика по сравнению с толщиной покрывающего слоя. Отношение предназначенной для обработки нагревателями протяженности пласта к толщине покрывающего слоя может быть равным по меньшей мере 3, по меньшей мере 5 или по меньшей мере 10. Нагреватели циркуляционной системы могут быть размещены относительно соседних с ними нагревателей таким образом, чтобы суперпозиция тепла между нагревателями циркуляционной системы обеспечивала подъем температуры пласта, по крайней мере, выше температуры кипения водного пластового флюида в пласте.

В некоторых вариантах осуществления нагреватели 220 могут быть сформированы в пласте путем пробуривания первого ствола скважины и затем пробуривания второго ствола скважины, который соединяется с первым стволом. Для создания U-образного нагревателя 220 в U-образный скважинный ствол помещают систему трубопроводов. Нагреватели 220 соединяют с помощью системы трубопроводов с циркуляционной системой 222 для теплопереноса текучей среды. В качестве теплопереносающей текучей среды в системах циркуляции с замкнутым контуром может быть использован газ под высоким давлением. В некоторых вариантах осуществления теплопереносающей текучей средой является диоксид углерода. Диоксид углерода химически стоек при применяемых температурах и давлениях и имеет относительно высокий молекулярный вес, благодаря чему он обладает высокой объемной теплоемкостью. Могут быть также использованы и другие текучие среды, такие как водяной пар, воздух, гелий и/или азот. Давление поступающей в пласт теплопереносающей текучей среды может составлять 3000 кПа или выше. Применение теплопереносающей текучей среды под высоким давлением придает теплопереносающей текучей среде более высокую плотность и, следовательно, большую способность переносить тепло. При этом имеет место меньшее падение давления при переходе от нагревателя к нагревателю для системы, в которой теплопереносающая текучая среда поступает в нагреватели под первым давлением для заданного массового расхода, чем когда теплопереносающая текучая среда поступает в нагреватели под вторым давлением при том же массовом расходе, когда первое давление выше, чем второе давление.

Система 222 циркуляции для теплопереносающей текучей среды может включать в себя источник тепла 224, первый теплообменник 226, второй теплообменник 228 и компрессор 230. Источник тепла 224 нагревает теплопереносающую текучую среду до высокой температуры. Источником тепла может быть печь, солнечный коллектор, реактор, тепло выхлопа топливного элемента или другой источник высокой температуры, способный отдавать тепло теплопереносающей текучей среде. В варианте осуществления, показанном на фиг. 3, источник тепла 224 нагревает теплопереносающую текучую среду до температуры в пределах от примерно 700 до примерно 920°C, от примерно 770 до примерно 870°C или от примерно 800 до примерно 850°C. В одном из вариантов осуществления тепловой источник 224 нагревает теплопереносающую текучую среду до температуры примерно 820°C. Теплопереносающая текучая среда протекает от

теплового источника 224 к нагревателям 220. Тепло переносится от нагревателей 220 к примыкающему к нагревателям пласту 232. Температура теплопереносящей текучей среды, выходящей из пласта 232, может быть в пределах от примерно 350 до примерно 580°C, от примерно 400 до примерно 530°C или от примерно 450 до примерно 500°C. В одном из вариантов осуществления температура выходящей из пласта 232 теплопереносящей текучей среды равна примерно 480°C. Состав металла для системы трубопроводов, используемых для создания циркуляционной системы 222 для теплопереносящей текучей среды, можно варьировать с целью существенного снижения себестоимости системы трубопроводов. Высокотемпературная сталь может быть использована от печи 224 до точки, где температура достаточно низка, благодаря чему от этой точки до первого теплообменника 226 может быть использована менее дорогая сталь. Для создания системы трубопроводов циркуляционной системы 222 для теплопереносящей текучей среды могут быть использованы несколько разных марок стали.

Теплопереносящая текучая среда от источника тепла 224 циркуляционной системы 222 для теплопереносящей текучей среды проходит через покрывающий слой 234 пласта 232 к углеводородному слою 236. Части нагревателей 220, проходящие через покрывающий слой 234, могут быть изолированы. В некоторых вариантах осуществления изоляция или часть изоляции выполнены из полиимидного изоляционного материала. Входные части нагревателей 220 в углеводородном слое 236 могут иметь конусообразную изоляцию с целью снижения перегрева углеводородного слоя около входа нагревателя в углеводородный слой.

В некоторых вариантах осуществления диаметр трубы в покрывающем слое 234 может быть меньше диаметра трубы через углеводородный слой 236. Труба с меньшим диаметром через покрывающий слой 234 обеспечивает меньший перенос тепла в покрывающий слой 234. Уменьшение величины теплопереноса в покрывающий слой 234 уменьшает степень охлаждения теплопереносящей текучей среды, подаваемой в трубопровод, примыкающий к углеводородному слою 236. Повышенный теплоперенос при меньшем диаметре трубы из-за увеличенной скорости теплопереносящей текучей среды через трубу меньшего диаметра компенсируется меньшей площадью поверхности трубы меньшего диаметра и уменьшением времени пребывания теплопереносящей текучей среды в трубе меньшего диаметра.

После выхода из пласта 232 теплопереносящая текучая среда проходит через первый теплообменник 226 и второй теплообменник 228 к компрессору 230. Первый теплообменник 226 переносит тепло между теплопереносящей текучей средой, выходящей из пласта 232, и теплопереносящей текучей средой, выходящей из компрессора 230, в результате чего повышается температура теплопереносящей текучей среды, которая поступает в источник тепла 224, и снижается температура текучей среды, выходящей из пласта 232. Второй теплообменник 228 дополнительно понижает температуру теплопереносящей текучей среды перед тем, как теплопереносящая текучая среда поступит в компрессор 230.

На фиг. 4 показан вид сверху одного из вариантов выполнения отверстий стволов скважин в пласте, который должен нагреваться с использованием циркуляционной системы. Входы 238 теплопереносящей текучей среды в пласт 232 чередуются с выходами 240 теплопереносящей текучей среды. Чередование входов 238 теплопереносящей текучей среды с выходами 240 теплопереносящей текучей среды обеспечивает более равномерный нагрев углеводородов в пласте 232.

Циркуляционная система может использоваться для нагрева части пласта. Эксплуатационные скважины в пласте используются для вывода добываемых флюидов. После прекращения добычи из пласта циркуляционная система может быть использована для рекуперации тепла из пласта. Теплопереносящая текучая среда может циркулировать через нагреватели 220 после отключения источника тепла 224 (изображенного на фиг. 3) от циркуляционной системы. Эта теплопереносящая текучая среда может быть теплопереносящей текучей средой, отличной от теплопереносящей текучей среды, используемой для нагрева пласта. Тепло переносится от нагретого пласта к теплопереносящей текучей среде. Теплопереносящая текучая среда может использоваться для нагрева другой части пласта, или же теплопереносящая текучая среда может использоваться для других целей. В некоторых вариантах осуществления в нагреватели 220 вводят воду для получения водяного пара. В некоторых вариантах осуществления в нагреватели 220 вводят низкотемпературный пар, в результате чего прохождение пара через нагреватели повышает температуру пара. Вместо пара или воды, могут использоваться другие теплопереносящие текучие среды, в том числе природная нефть или синтетические масла, такие как масло Syltherm (Dow Corning Corporation (Midland, Мичиган, США)).

В некоторых вариантах осуществления циркуляционная система может применяться в сочетании с электрическим нагревом. В некоторых вариантах осуществления по крайней мере часть трубы в U-образных стволах скважин, примыкающая к нагреваемым частям пласта, выполнена из ферромагнитного материала. Например, система трубопроводов, примыкающая к слою или слоям нагреваемого пласта, выполнена из стали с 9-13% хрома, такой как нержавеющая сталь 410. В случае подачи в систему трубопроводов изменяющегося во времени электрического тока трубопровод может быть нагревателем с ограничением температуры. Изменяющийся во времени электрический ток может резистивно нагревать систему трубопроводов, которая нагревает пласт. В некоторых вариантах осуществления для резистивного нагрева системы трубопроводов, которая нагревает пласт, может использоваться постоянный электрический ток.

В некоторых вариантах осуществления циркуляционную систему используют для нагрева пласта до первой температуры, а электрическую энергию используют для поддержания температуры пласта и/или нагрева пласта до более высоких температур. Первая температура может быть достаточной для испарения в пласте водного пластового флюида. Первая температура может быть не выше примерно 200°C, не выше примерно 300°C, не выше примерно 350°C или не выше примерно 400°C. Применение циркуляционной системы для нагрева пласта до первой температуры позволяет высушивать пласт перед тем, как для обогрева пласта будет использовано электричество. Нагрев сухого пласта может свести к минимуму утечки электрического тока в пласт.

В некоторых вариантах осуществления для нагрева пласта до первой температуры могут быть использованы циркуляционная система и электронагрев. Температура пласта может поддерживаться, или температура пласта может подниматься выше первой температуры с использованием циркуляционной системы и/или электронагрева. В некоторых вариантах осуществления температура пласта может быть поднята до первой температуры с использованием электронагрева, после чего температура пласта может поддерживаться и/или подниматься с использованием циркуляционной системы. Для определения того, когда следует использовать электронагрев и/или нагрев циркуляционной системой, могут использоваться экономические факторы, наличие электричества, наличие топлива для нагрева теплопереносящей текучей среды и другие факторы.

В некоторых вариантах осуществления изобретения часть нагревателя 220 в углеводородном пласте 236 соединена с соединительными проводниками. Соединительные проводники могут размещаться в покрывающем слое 234. Соединительные проводники могут электрически соединять часть нагревателя 220 в углеводородном слое 236 с одним или более устьями скважин на поверхности. На сочленении части нагревателя 220 в углеводородном слое 236 с частями нагревателя 220 в покрывающем слое 234 могут быть помещены изоляторы таким образом, чтобы часть нагревателя в покрывающем слое была электрически изолирована от части нагревателя в углеводородном слое. В некоторых вариантах осуществления соединительные проводники помещаются внутри трубопровода циркуляционной системы с замкнутым контуром. В некоторых вариантах осуществления соединительные проводники помещаются вне трубопровода циркуляционной системы с замкнутым контуром. В некоторых вариантах осуществления соединительные проводники представляют собой изолированные провода с минеральной изоляцией, например, из оксида магния. Соединительными проводниками могут быть высокопроводящие материалы, такие как медь или алюминий, обеспечивающие снижение потерь тепла в покрывающем слое 234 в процессе электронагрева.

В некоторых вариантах осуществления в качестве соединительных проводников могут быть части нагревателя 220 в покрывающем слое 234. Части нагревателя 220 в покрывающем слое 234 могут быть электрически соединены с частью нагревателя 220 в углеводородном слое 236. В некоторых вариантах осуществления для уменьшения электросопротивления частей нагревателя в покрывающем слое части нагревателя 220 в покрывающем слое 234 соединены (например, контактно или сваркой) с одним или более электропроводящим материалом (таким, как медь или алюминий). Уменьшение электросопротивления частей нагревателя 220 в покрывающем слое 234 снижает потери тепла в покрывающем слое в процессе электронагрева.

В некоторых вариантах осуществления нагреватель 220 в углеводородном слое 236 является нагревателем с ограничением температуры, самостоятельно ограничивающим температуру в пределах от примерно 600 до примерно 1000°C. Часть нагревателя 220 в углеводородном слое 236 может быть выполнена из стали с 9-13% хрома. Например, часть нагревателя 220 в углеводородном слое 236 может быть выполнена из нержавеющей стали 410. В часть нагревателя 220 в углеводородном слое 236 может подаваться изменяющийся во времени ток, в результате чего нагреватель работает как нагреватель с ограничением температуры.

На фиг. 5 показан вид с боку одного из вариантов осуществления системы для нагрева части пласта с использованием системы циркуляции текучей среды и/или электронагрева. Устья 242 нагревателей 220 могут быть соединены трубопроводами с системой 222 циркуляции теплопереносящей текучей среды. Устья 242 могут быть также соединены с системой 244 подачи электроэнергии. В некоторых вариантах осуществления система 222 циркуляции теплопереносящей текучей среды отключается от нагревателей, когда для нагрева пласта используется электроэнергия. В некоторых вариантах осуществления система 244 подачи электроэнергии отключается от нагревателей, когда для нагрева пласта используется система 222 циркуляции теплопереносящей текучей среды.

Система 244 подачи электроэнергии может включать в себя трансформатор 246 и кабели 248, 250. В некоторых вариантах осуществления кабели 248, 250 и/или кабель 250 способны проводить большие токи с низкими потерями. Например, кабели 248, 250 могут быть толстыми медными или алюминиевыми проводниками. Кабели могут также иметь толстые слои изоляции. В некоторых вариантах осуществления кабель 248 и/или кабель 250 могут быть сверхпроводящими кабелями. Сверхпроводящие кабели могут охлаждаться жидким азотом. Сверхпроводящие кабели могут быть приобретены у Superpower, Inc. (Schenectady, Нью-Йорк, США). Сверхпроводящие кабели могут сводить к минимуму потери энергии и/или уменьшать размер кабелей, необходимых для подключения к нагревателям трансформатора 246.

Нагреватели с ограничением температуры могут быть в конфигурациях выполнены из материалов, которые придают нагревателям способность автоматически ограничивать температуру при определенных температурах и/или могут включать в себя такие материалы. В некоторых вариантах осуществления в нагревателях с ограничением температуры используются ферромагнитные материалы. Ферромагнитный материал может самоограничивать температуру при или вблизи от температуры Кюри материала, выделяя пониженное количество тепла при или вблизи от температуры Кюри, когда в материал подается изменяющийся во времени ток. В некоторых вариантах осуществления ферромагнитный материал самоограничивает температуру нагревателя с ограничением температуры при выбранной температуре, которая приблизительно равна температуре Кюри. В некоторых вариантах осуществления температура отклоняется от температуры Кюри на 35, на 25, на 20 или на 10°C. В некоторых вариантах осуществления ферромагнитные материалы соединяют с другими материалами (например, с материалами с высокой проводимостью, высокопрочными материалами, антикоррозионными материалами или их комбинациями) с целью получения разнообразных электрических и/или механических свойств. Некоторые части нагревателя с ограничением температуры могут иметь более низкое сопротивление (по причине различий в геометрии и/или использования разных ферромагнитных и/или неферромагнитных материалов) по сравнению с другими частями нагревателя с ограничением температуры. Наличие в нагревателе с ограничением температуры частей из различных материалов, и/или имеющих различные размеры, позволяет регулировать желаемый выход тепла от каждой части нагревателя.

Нагреватели с ограничением температуры могут быть более надежными по сравнению с другими нагревателями. Нагреватели с ограничением температуры могут быть менее подвержены поломкам или отказам из-за горячих участков в пласте. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры обеспечивают, по существу, равномерный нагрев пласта. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры способны нагревать пласт более эффективно при работе с более высоким средним выходом тепла по всей длине нагревателя. Нагреватель с ограничением температуры работает с более высоким средним выходом тепла по всей длине нагревателя, потому что в том случае, когда температура около какой-либо точки нагревателя превышает (или должна превысить) максимальную рабочую температуру нагревателя, нет необходимости уменьшать энергию, подаваемую на весь нагреватель, как это имеет место в случае обычных нагревателей постоянной мощности. Выход тепла от частей нагревателя с ограничением температуры, приближающейся к температуре Кюри нагревателя, автоматически снижается без регулируемой подстройки изменяющегося во времени тока, подаваемого на нагреватель. Выход тепла автоматически снижается из-за изменений электрических свойств (например, электросопротивления) частей нагревателя с ограничением температуры. Таким образом, нагреватель с ограничением температуры вводит большую мощность в течение большей части нагревательного процесса.

В некоторых вариантах осуществления система, включающая нагреватели с ограничением температуры, обеспечивает первый выход тепла и затем обеспечивает пониженный выход тепла (второй выход тепла) вблизи, при или выше температуры Кюри электрорезистивной части нагревателя, когда нагреватель с ограничением температуры запитывается изменяющимся во времени током. Первый выход тепла является выходом тепла при температурах, ниже которых нагреватель с ограничением температуры начинает самоограничиваться. В некоторых вариантах осуществления первый выход тепла - это выход тепла при температуре на 50, 75, 100 или 125°C ниже температуры Кюри ферромагнитного материала в нагревателе с ограничением температуры.

Нагреватель с ограничением температуры может запитываться изменяющимся во времени током (переменным током или модулированным постоянным током), подаваемым в устье скважины. В устье может находиться источник энергии и другие компоненты (например, компоненты модуляции, трансформаторы и/или конденсаторы), используемые для подачи энергии в нагреватель с ограничением температуры. Нагреватель с ограничением температуры может быть одним из многих нагревателей, используемых для нагревания части пласта.

В некоторых вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры включает в себя проводник, который в случае подачи в него изменяющегося во времени тока работает как нагреватель со скин-эффектом или нагреватель близости скин-эффекта. Скин-эффект ограничивает глубину проникания тока внутрь проводника. Для ферромагнитных материалов скин-эффект перекрывается магнитной проницаемостью проводника. Относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов обычно составляет от 10 до 1000 (например, относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов обычно составляет по меньшей мере 10 и может быть по меньшей мере 50, 100, 500, 1000 или выше). По мере повышения температуры ферромагнитного материала выше температуры Кюри и/или по мере увеличения электрического тока, магнитная проницаемость ферромагнитного материала значительно уменьшается и глубина скин-слоя быстро увеличивается (в частности, глубина скин-слоя увеличивается как обратная величина квадратного корня из магнитной проницаемости). Результатом уменьшения магнитной проницаемости является уменьшение сопротивления переменному току или модулированному постоянному току проводника вблизи, при или выше температуры Кюри и/или при повышении подаваемого электрического тока. Когда нагреватель с ограничением температуры получает энергию от ис-

точника, по существу, постоянного тока, рассеяние тепла от частей нагревателя, которые приближаются к, достигают или превышают температуру Кюри, может уменьшаться. На отрезках нагревателя с ограничением температуры, температура которых не равна или не близка к температуре Кюри, может преобладать нагревание над скин-эффектом, что позволяет нагревателю иметь более высокое рассеяние тепла за счет более высокой активной нагрузки.

Преимуществом применения нагревателя с ограничением температуры для нагрева углеводородов в пласте является то, что подбирается проводник, имеющий температуру Кюри для работы в желаемом диапазоне температур. Работа в желаемом диапазоне рабочих температур делает возможным значительный ввод тепла в пласт, поддерживая при этом температуру нагревателя с ограничением температуры и другого оборудования ниже предельных проектных температур. Предельными проектными температурами являются температуры, при которых ухудшаются такие свойства, как коррозия, ползучесть и/или деформация. Способность ограничивать температуру нагревателя с ограничением температуры препятствует перегреву или прогоранию нагревателя вблизи обладающих низкой теплопроводностью «горячих участков» в пласте. В некоторых вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры способен снижать или регулировать выход тепла и/или выдерживать тепло при температурах выше 25, 37, 100, 250, 500, 700, 800, 900 или выше до 1131°C в зависимости от используемых в нагревателе материалов.

Нагреватель с ограничением температуры позволяет вводить в пласт больше тепла, чем нагреватели постоянной мощности, поскольку нет необходимости ограничивать энергию, подаваемую в нагреватель с ограничением температуры, с целью соответствия ее примыкающим к нагревателю областям с низкой теплопроводностью. Например, на Гринриверском месторождении нефтеносных сланцев разница в теплопроводности между наиболее богатыми и наиболее бедными слоями нефтеносных сланцев составляет 3 раза. При нагревании такого пласта нагреватель с ограничением температуры передает в пласт значительно больше тепла, чем традиционный нагреватель, который ограничен температурой слоев с наиболее низкой теплопроводностью. Чтобы традиционный нагреватель не перегревался и не прогорал у слоев с низкой теплопроводностью, необходимо, чтобы выход тепла по всей длине нагревателя соответствовал слоям с низкой теплопроводностью. Выход тепла вблизи слоев с низкой теплопроводностью, находящихся при высокой температуре, в случае нагревателя с ограничением температуры снизится, но остальные части, не находящиеся при высокой температуре, будут при этом обеспечивать высокий выход тепла. Поскольку нагреватели для нагрева углеводородных пластов имеют, как правило, большую длину (например, по меньшей мере 10, 100, 300, 500 м, 1 км или более вплоть до 10 км), большая часть длины нагревателя с ограничением температуры может работать ниже температуры Кюри, в то время как лишь небольшие части находятся при или вблизи температуры Кюри нагревателя с ограничением температуры.

Применение нагревателя с ограничением температуры обеспечивает эффективный перенос тепла к пласту. Эффективный перенос тепла позволяет сократить время, необходимое для нагрева пласта до желаемой температуры. При том же самом пространстве для размещения нагревателя нагреватели с ограничением температуры обеспечивают больший средний выход тепла, поддерживая при этом температуру нагревательного оборудования ниже проектных предельных температур для этого оборудования. Благодаря более высокому среднему выходу тепла, который обеспечивают нагреватели с ограничением температуры, пиролиз в пласте в этом случае происходит раньше, чем при более низком среднем выходе тепла, обеспечиваемом нагревателями с постоянной мощностью. Нагреватели с ограничением температуры нейтрализуют горячие участки, образующиеся в результате неточного размещения скважины или бурения, когда нагревательные скважины располагаются слишком близко одна от другой. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры позволяют обеспечивать через определенное время повышенную выходную мощность для нагревательных скважин, которые размещены слишком далеко одна от другой, или ограничивает выходную мощность для нагревательных скважин, которые размещены слишком близко одна от другой. Нагреватели с ограничением температуры вводят также большую мощность в области, примыкающие к покрывающему слою и к основанию, компенсируя, тем самым, температурные потери в этих областях.

Нагреватели с ограничением температуры могут быть с успехом использованы в пластах многих типов. Например, в пластах нефтеносных песков или относительно проницаемых пластах, содержащих тяжелые углеводороды, нагреватели с ограничением температуры могут быть использованы для обеспечения регулируемой низкотемпературной добычи, при которой имеют место снижение вязкости флюидов, подвижность флюидов и/или усиление радиального потока флюидов в стволе скважины, вблизи него или в пласте. Нагреватели с ограничением температуры могут использоваться для снижения коксообразования в результате перегрева в области пласта вблизи ствола скважины.

Применение нагревателей с ограничением температуры в некоторых вариантах осуществления устраняет или уменьшает необходимость в дорогостоящих схемах температурного контроля. Например, применение нагревателей с ограничением температуры устраняет или уменьшает необходимость выполнять изменение температурных показаний и/или необходимо использовать на нагревателях термомпар для отслеживания возможного перегрева в горячих участках.

Используемый в нагревателях с ограничением температуры ферромагнитный сплав или ферромаг-

нитные сплавы определяют температуру Кюри нагревателя. Ферромагнитные проводники могут содержать в себе один или более ферромагнитных элементов (железо, кобальт и никель) и/или сплавов этих элементов. В некоторых вариантах осуществления ферромагнитные проводники включают железохромовые (Fe-Cr) сплавы, которые содержат вольфрам (W) (например, HCM12A и SAVE12 (Sumitomo Metals Co., Япония), и/или железные сплавы, которые содержат хром (например, Fe-Cr сплавы, Fe-Cr-W сплавы, Fe-Cr-V (ванадий), Fe-Cr-Nb (ниобий) сплавы). Из трех главных ферромагнитных элементов железо имеет температуру Кюри, равную 770°C, кобальт (Co) имеет температуру Кюри 1131°C и никель (Ni) имеет температуру Кюри приблизительно 358°C. Сплавы железо-кобальт имеют температуру Кюри выше температуры Кюри железа. Например, сплав железо-кобальт с 2 вес.% кобальта имеет температуру Кюри 800°C, сплав железо-кобальт с 12 вес.% кобальта имеет температуру Кюри 900°C и сплав железо-кобальт с 20 вес.% кобальта имеет температуру Кюри 950°C. Сплав железо-никель имеет температуру Кюри ниже температуры Кюри железа. Например, сплав железо-никель с 20 вес.% никеля имеет температуру Кюри 720°C, а сплав железо-никель с 60 вес.% никеля имеет температуру Кюри 560°C.

Некоторые неферромагнитные элементы повышают температуру Кюри железа. Например, железо-ванадиевый сплав с 6,9 вес.% ванадия имеет температуру Кюри, равную приблизительно 815°C. Другие неферромагнитные элементы (например, углерод, алюминий, медь, кремний и/или хром) могут быть сплавлены с железом или другими ферромагнитными материалами, понижая при этом температуру Кюри. Неферромагнитные материалы, которые повышают температуру Кюри, могут комбинироваться с неферромагнитными материалами, которые понижают температуру Кюри, и сплавлены с железом или другими ферромагнитными материалами с образованием материала с желаемой температурой Кюри и другими желаемыми физическими и/или химическими свойствами. В некоторых вариантах осуществления материалом с температурой Кюри является феррит, такой как NiFe_2O_4 . В других вариантах осуществления материалом с температурой Кюри является бинарное соединение, такое как FeNi_3 или Fe_3Al .

Некоторые варианты осуществления нагревателя с ограничением температуры могут включать более одного ферромагнитного материала. Такие варианты осуществления не выходят за рамки вариантов осуществления, описанные в заявке, если какие-либо описанные в заявке условия применимы к по крайней мере одному из ферромагнитных материалов в нагревателе с ограничением температуры.

При приближении к температуре Кюри ферромагнитные свойства, как правило, ослабляются. Самоограничиваемая температура может быть несколько ниже реальной температуры Кюри ферромагнитного материала. Глубина скин-слоя для тока в стали с 1% углерода равна 0,132 см при комнатной температуре и повышается до 0,445 см при 720°C. От 720 до 730°C глубина скин-слоя возрастает до более чем 2,5 см. Таким образом, вариант осуществления нагревателя с ограничением температуры с использованием стали с 1% углерода начинает самоограничиваться при температуре от 650 до 730°C.

Глубина скин-слоя определяет эффективную глубину проникновения изменяемого во времени тока в проводящий материал. Как правило, плотность тока убывает экспоненциально с расстоянием от внешней поверхности к центру вдоль радиуса проводника. Глубину, при которой плотность тока равна приблизительно 1/e от поверхностной плотности тока, называют глубиной скин-слоя. Для твердого цилиндрического стержня с диаметром, намного большим глубины проникновения, или для полых цилиндров с толщиной стенки, превышающей глубину проникновения, глубина скин-слоя δ равна:

$$(1) \quad \delta = 1981,5 * (\rho / (\mu * f))^{1/2},$$

где δ обозначает глубину скин-слоя в дюймах,

ρ обозначает удельное сопротивление при рабочей температуре (Ом-см),

μ обозначает относительную магнитную восприимчивость и

f обозначает частоту (Гц).

Уравнение (1) взято из учебника "Electrical Heating for Industry" (Электронагрев в промышленности), С.Л. Erickson (IEEE Press, 1995). Для большинства металлов удельное сопротивление (ρ) возрастает с температурой. Относительная магнитная проницаемость, как правило, меняется с температурой и током. Для описания изменения магнитной проницаемости и/или глубины скин-слоя с температурой и/или током могут быть использованы дополнительные уравнения. Зависимость μ от тока получается из зависимости μ от магнитного поля.

Материалы, используемые в нагревателе с ограничением температуры, могут быть подобраны таким образом, чтобы обеспечивать требуемое отношение верхнего предела диапазона регулирования к нижнему. Для нагревателей с ограничением температуры могут быть выбраны указанные отношения, составляющие по меньшей мере 1,1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 10:1, 30:1 или 50:1. Могут быть использованы и более высокие отношения. Выбранные отношения могут зависеть от ряда факторов, включающих (но не ограничивающихся ими) тип пласта, в котором расположен нагреватель с ограничением температуры (например, более высокие отношения могут использоваться для пласта нефтеносного сланца с большими колебаниями величины теплопроводности между богатыми и бедными слоями нефтеносного сланца), и/или температурный предел материалов, используемых в стволе скважины (например, температурные пределы материалов нагревателя). В некоторых вариантах осуществления отношение верхнего предела диапазона регулирования к нижнему повышается при подключении к ферромагнитному материалу до-

полнительного медного или какого-либо другого хорошего электрического проводника (например, при добавлении меди для понижения сопротивления при температуре выше температуры Кюри).

Нагреватель с ограничением температуры может обеспечивать минимальный выход тепла (выходную мощность) ниже температуры Кюри нагревателя. В некоторых вариантах осуществления минимальный выход тепла составляет по меньшей мере 400, 600, 700, 800 Вт/м или выше вплоть до 2000 Вт/м. Нагреватель с ограничением температуры снижает величину выхода тепла отрезком нагревателя, когда температура отрезка нагревателя приближается к температуре Кюри или превышает ее. Уменьшенное количество тепла может быть, по существу, меньше, чем выход тепла при температуре ниже температуры Кюри. В некоторых вариантах осуществления уменьшенная величина тепла составляет, самое большее, 400, 200, 100 Вт/м или может приближаться к 0 Вт/м.

В некоторых вариантах осуществления частоту переменного тока регулируют так, чтобы изменять глубину скин-слоя ферромагнитного материала. Например, глубина скин-слоя стали с 1% углерода при комнатной температуре равна 0,132 см при 60 Гц, 0,0762 см при 180 Гц и 0,046 см при 440 Гц. Поскольку диаметр нагревателя, как правило, более чем вдвое больше глубины скин-слоя, использование более высокой частоты (и, следовательно, нагревателя с меньшим диаметром) снижает расходы на нагреватель. Для одной и той же геометрии более высокая частота повышает отношение верхнего предела диапазона регулирования к нижнему. Это отношение при более высокой частоте рассчитывается путем умножения этого отношения при более низкой частоте на корень квадратный из более высокой частоты, поделенной на более низкую частоту. В некоторых вариантах осуществления используют частоту от 100 до 1000 Гц, от 140 до 200 Гц, от 400 до 600 Гц (например, 180, 540 или 720 Гц). В некоторых вариантах осуществления могут использоваться высокие частоты. Частоты могут быть выше 1000 Гц.

В некоторых вариантах осуществления для подачи электроэнергии на нагреватель с ограничением температуры может использоваться модулированный постоянный ток (например, прерывистый постоянный ток, волнообразно модулированный постоянный ток или циклически повторяющийся постоянный ток). Для обеспечения модулированного постоянного тока источник постоянного тока подсоединен к модулятору или прерывателю постоянного тока. В некоторых вариантах осуществления источник постоянного тока может включать в себя устройство для модулирования постоянного тока. Одним из примеров модулятора постоянного тока является система преобразования постоянного тока в постоянный ток. Системы преобразования постоянного тока в постоянный ток в технике, в общем, известны. Постоянный ток, как правило, модулируют или прерывают, получая желаемую волновую форму. Волновые формы для модулирования постоянного тока включают (но не ограничиваются этим) прямоугольные, синусоидальные, деформированные синусоидальные, деформированные прямоугольные, треугольные и другие регулярные и нерегулярные волновые формы.

Волновая форма модулированного постоянного тока определяет частоту модулированного постоянного тока. Следовательно, волновая форма модулированного постоянного тока может подбираться так, чтобы обеспечить желаемую частоту модулированного постоянного тока. Геометрическую форму и/или скорость модуляции (такую, как скорость прерывания) волновой формы модулированного постоянного тока можно изменять с целью изменения частоты модулированного постоянного тока. Постоянный ток можно модулировать с частотами, которые выше обычно практикуемых частот переменного тока. Например, модулированный постоянный ток может быть получен с частотой по меньшей мере 1000 Гц. Повышение частоты подаваемого тока до более высоких значений благоприятно увеличивает у нагревателя с ограничением температуры отношение верхнего предела диапазона регулирования к нижнему.

В некоторых вариантах осуществления волновую форму модулированного постоянного тока подстраивают или изменяют для изменения частоты модулированного тока. Модулятор позволяет подстраивать или изменять модулированную волновую форму в любое время в период использования нагревателя с ограничением температуры и при больших токах или напряжениях. Таким образом, модулированный постоянный ток, подаваемый на нагреватель с ограничением температуры, не ограничен какой-либо одной частотой или даже небольшим рядом значений частот. Выбор формы волны с использованием модулятора постоянного тока допускает, как правило, широкий диапазон частот модулированного постоянного тока и дискретное регулирование частоты модулированного постоянного тока. Благодаря этому частота модулированного постоянного тока легче устанавливается на индивидуальное значение, в то время как частота переменного тока обычно ограничена множеством частот сети. Дискретное регулирование частоты модулированного постоянного тока позволяет осуществлять более селективное регулирование отношения верхнего предела диапазона регулирования к нижнему у нагревателя с ограничением температуры. Возможность селективного регулирования этого отношения у нагревателя с ограничением температуры позволяет использовать более широкий спектр материалов при проектировании и конструировании нагревателя с ограничением температуры.

В некоторых вариантах осуществления частота модулированного постоянного тока или частота переменного тока регулируется с целью изменения свойств (например, подземных условий, таких как температура или давление) нагревателя с ограничением температуры в процессе его эксплуатации. Частоту модулированного постоянного тока или частоту переменного тока, подаваемого в нагреватель с ограничением температуры, варьируют с учетом оценки условий в стволе скважины. Например, при повыше-

нии температуры нагревателя с ограничением температуры в стволе скважины может оказаться целесообразным повысить частоту подаваемого в нагреватель тока, повышая, тем самым, в нагревателе отношение верхнего предела диапазона регулирования к нижнему. В одном из вариантов осуществления оценивается температура донной части нагревателя с ограничением температуры в стволе скважины.

В некоторых вариантах осуществления частоту модулированного постоянного тока или частоту переменного тока варьируют с целью регулирования в нагревателе с ограничением температуры отношения верхнего предела диапазона регулирования к нижнему. Это отношение можно регулировать с целью нейтрализации горячих участков, встречающихся вдоль длины нагревателя с ограничением температуры. Указанное отношение повышаются, например, по причине того, что нагреватель с ограничением температуры в некоторых местах становится слишком горячим. В некоторых вариантах осуществления частоту модулированного постоянного тока или частоту переменного тока варьируют с целью регулирования в нагревателе с ограничением температуры отношения верхнего предела диапазона регулирования к нижнему без оценки подземных условий.

В некоторых вариантах осуществления, относящихся к осуществлению циркуляционной системы, часть системы трубопроводов, прилегающая к предназначенным для нагрева участкам пласта, выполнена из нержавеющей стали с 9-13% хрома, такой как нержавеющая сталь 410, выбранной с учетом свойств материала. Система трубопроводов из нержавеющей стали 410 относительно недорога и легко доступна. Нержавеющая сталь 410 является ферромагнитным материалом и по этой причине, если для резистивного нагрева системы трубопроводов применяется изменяемый во времени ток, система трубопроводов становится нагревателем с ограничением температуры. При этом скорость сульфидизации нержавеющей стали 410 относительно низка, и эта скорость снижается при повышении температуры, по крайней мере, в пределах температур от примерно 530 до 650°C. Характеристики сульфидизации делают нержавеющую сталь 410 хорошим материалом для применения в процессах конверсии *in situ*.

На фиг. 6 приведены данные по температурной (°C) зависимости электросопротивления (МОм) для сплошного стержня из нержавеющей стали 410 диаметром 2,54 см и длиной 1,8 м при разных значениях подаваемого тока. Кривые 252, 254, 256, 258 и 260 описывают профили сопротивления как функцию температуры для стержня из нержавеющей стали 410 при 40 А переменного тока (кривая 258), 70 А переменного тока (кривая 260), 140 А переменного тока (кривая 252), 230 А переменного тока (кривая 254) и 10 А постоянного тока (кривая 256). В случае применения переменных токов 140 и 230 А сопротивление постепенно повышается с ростом температуры, пока не достигается температура Кюри. При температуре Кюри сопротивление резко падает. Напротив, в случае применения постоянного тока сопротивление демонстрирует равномерный рост с температурой при проходе через температуру Кюри.

На фиг. 7 приведены данные для значений глубины скин-слоя (см) в зависимости от температуры (°C) для сплошного стержня из нержавеющей стали 410 диаметром 2,54 см и длиной 1,8 м при разных значениях подаваемого переменного тока. Глубину скин-слоя рассчитывали с использованием уравнения (2):

$$(2) \quad \delta = R_1 - R_1(1 - (1/R_{AC}/R_{DC}))^{1/2},$$

где δ обозначает глубину скин-слоя,

R_1 - радиус цилиндра,

R_{AC} - сопротивление при переменном токе и

R_{DC} - сопротивление при постоянном токе.

Кривые 262-282 на фиг. 7 описывают профили глубины скин-слоя как функцию температуры для применяемого переменного электрического тока в диапазоне от 50 до 500 А (262: 50 А; 264: 100 А; 266: 150 А; 268: 200 А; 270: 250 А; 272: 300 А; 274: 350 А; 278: 400 А; 280: 450 А; 282: 500 А). Для каждого значения применяемого переменного электрического тока глубина скин-слоя постепенно увеличивается с ростом температуры до температуры Кюри. При температуре Кюри глубина скин-слоя резко увеличивается.

На фиг. 8 приведены данные зависимости температуры (°C) от логарифма времени (ч) для 2,5 см сплошного стержня из нержавеющей стали 410 и 2,5 см сплошного стержня из нержавеющей стали 304. При одном и том же применяемом переменном электрическом токе температура каждого стержня со временем повышается. Кривая 284 демонстрирует данные термопары, помещенной на наружной поверхности стержня из нержавеющей стали 304 под слоем изоляции. Кривая 286 демонстрирует данные термопары, помещенной на наружной поверхности стержня из нержавеющей стали 304 без слоя изоляции. Кривая 288 демонстрирует данные термопары, помещенной на наружной поверхности стержня из нержавеющей стали 410 под слоем изоляции. Кривая 290 демонстрирует данные термопары, помещенной на наружной поверхности стержня из нержавеющей стали 410 без слоя изоляции. Сравнение кривых показывает, что температура стержня из нержавеющей стали 304 (кривые 284 и 286) повышается быстрее, чем температура стержня из нержавеющей стали 410 (кривые 288 и 290). Температура стержня из нержавеющей стали 304 (кривые 284 и 286) достигает при этом более высокого значения, чем температура стержня из нержавеющей стали 410 (кривые 288 и 290). Разница в температуре между неизолированным отрезком стержня из нержавеющей стали 410 (кривая 290) и изолированным отрезком стержня из нержавеющей стали 410 (кривая 288) меньше, чем разница в температуре между неизолированным отрезком

стержня из нержавеющей стали 304 (кривая 286) и изолированным отрезком стержня из нержавеющей стали 304 (кривая 284). Температура стержня из нержавеющей стали 304 продолжала повышаться при завершении эксперимента (кривые 284 и 286), в то время как температура стержня из нержавеющей стали 414 выравнивалась (кривые 288 и 290). Таким образом, стержень из нержавеющей стали 410 (нагреватель с ограничением температуры) обеспечивает лучшее управление температурой, чем стержень из нержавеющей стали 304 (не являющийся нагревателем с ограничением температуры) при наличии разных термических нагрузок (обусловленных изоляцией).

Дополнительные модификации и альтернативные варианты осуществления различных аспектов изобретения могут представляться специалистам в данной области очевидными на основании приведенного описания. Соответственно этому, настоящее описание следует воспринимать лишь как иллюстративное и целью его является показать специалистам в общем виде способ осуществления изобретения. Следует при этом иметь в виду, что показанные и описанные здесь формы изобретения следует рассматривать как, безусловно, предпочтительные варианты осуществления. Иллюстрируемые и описываемые в заявке элементы и материалы могут заменяться другими элементами и материалами, детали и способы могут быть обращены, а некоторые признаки изобретения могут применяться независимо, как это могло бы стать очевидным специалисту, имеющему возможность ознакомиться с приведенным описанием изобретения. Изменения могут производиться в отношении описанных здесь элементов без отхода от идеи и объема изобретения, описанных в приведенной ниже формуле изобретения. Следует, кроме того, иметь в виду, что описанные в заявке независимо признаки в некоторых вариантах осуществления могут быть объединены.

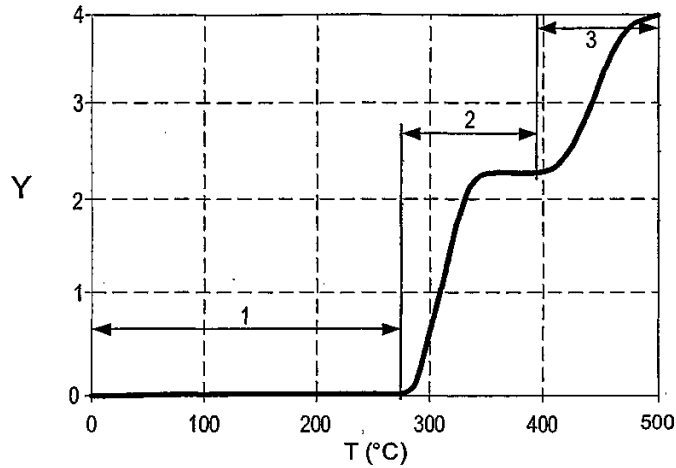
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система конверсии *in situ* для добычи углеводородов из подземного пласта, включающая множество U-образных стволов скважин в пласте, систему трубопроводов, размещенную в по меньшей мере двух указанных U-образных скважинных стволах, систему с текучей средой, соединенную с системой трубопроводов, и источник электроэнергии, который выполнен таким образом, чтобы подавать электрический ток в по крайней мере часть системы трубопроводов, расположенную ниже покрывающего слоя в пласте, для резистивного нагрева по меньшей мере части системы трубопроводов с дальнейшим переносом тепла от системы трубопроводов к пласту, отличающаяся тем, что система с текучей средой представляет собой систему циркуляции текучей среды, выполненную таким образом, чтобы горячая теплопереносящая текучая среда циркулировала через по крайней мере часть системы трубопроводов с целью создания по меньшей мере одной нагретой части пласта.
2. Система по п.1, в которой система трубопроводов в по меньшей мере двух стволах скважин создает возможность для суперпозиции тепла.
3. Система по любому из пп.1-2, в которой по крайней мере часть системы трубопроводов, примыкающая к нагреваемому участку пласта, содержит ферромагнитный материал.
4. Система по любому из пп.1-3, дополнительно включающая в себя по меньшей мере один соединительный проводник, электрически соединяющий участок системы трубопроводов в углеводородном слое с устьем скважины на поверхности.
5. Система по любому из пп.1-4, в которой часть системы трубопроводов, через которую теплопереносящая текучая среда вводится в пласт, имеет в покрывающем слое меньший диаметр, чем часть системы трубопроводов ниже покрывающего слоя.
6. Система по любому из пп.1-5, в которой источник электроэнергии выполнен таким образом, чтобы обеспечивать относительно постоянную величину изменяющегося во времени электрического тока.
7. Система по любому из пп.1-6, в которой по меньшей мере часть системы трубопроводов, проходящей через покрывающий слой, выполнена изолированной.
8. Система по любому из пп.1-7, в которой источником энергии является переменный ток или постоянный ток.
9. Способ нагрева подземного пласта с использованием системы по любому из пп.1-10, заключающийся в том, что нагревают теплопереносящую текучую среду; обеспечивают циркуляцию теплопереносящей текучей среды через систему трубопроводов в пласте для нагрева части пласта ниже покрывающего слоя и подают электрический ток в по крайней мере часть системы трубопроводов для резистивного нагрева системы трубопроводов.
10. Способ по п.9, в котором теплопереносящая текучая среда содержит диоксид углерода, водяной пар и/или гелий.
11. Способ по п.9 или 10, в котором теплопереносящая текучая среда включает нефть.

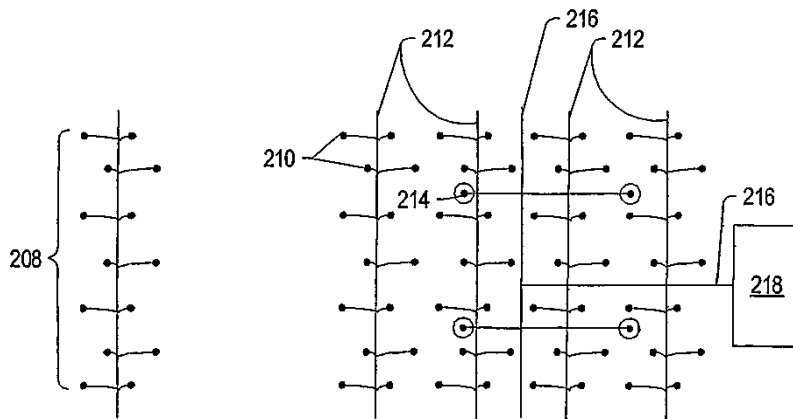
12. Способ по любому из пп.9-11, в котором при помощи циркулирующей текучей среды и/или подаваемого электрического тока нагревают часть пласта до первой температуры не выше 200, не выше 300, не выше 350 или не выше 400°C.

13. Способ по п.12, в котором при помощи электрического тока и/или циркулирующей теплопереносящей текучей среды повышают температуру пласта от указанной первой температуры.

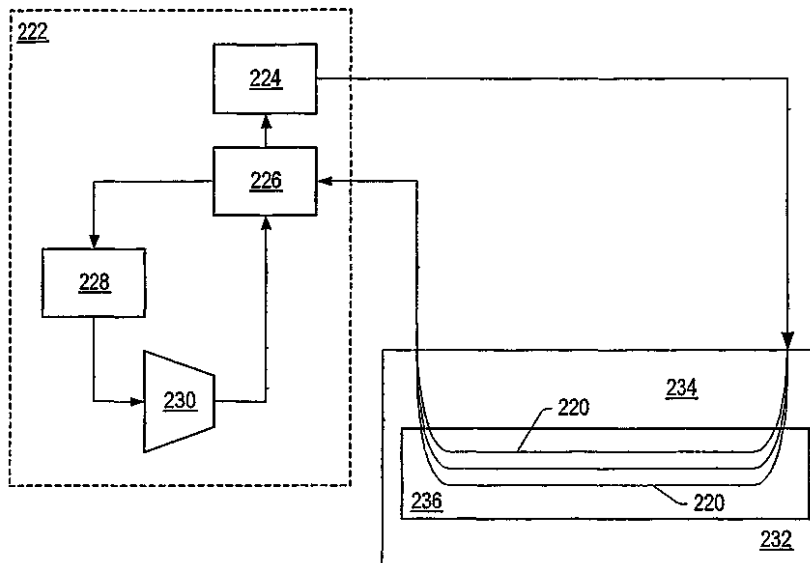
14. Способ по любому из пп.9-13, дополнительно включающий рекуперацию тепла из нагретого пласта путем циркуляции воды по системе трубопроводов.



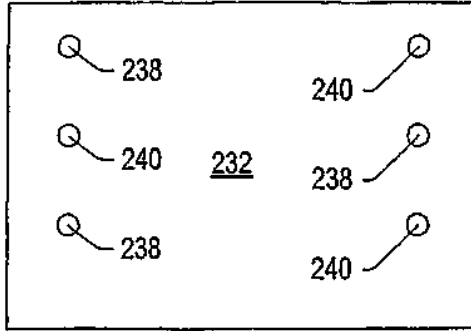
Фиг. 1



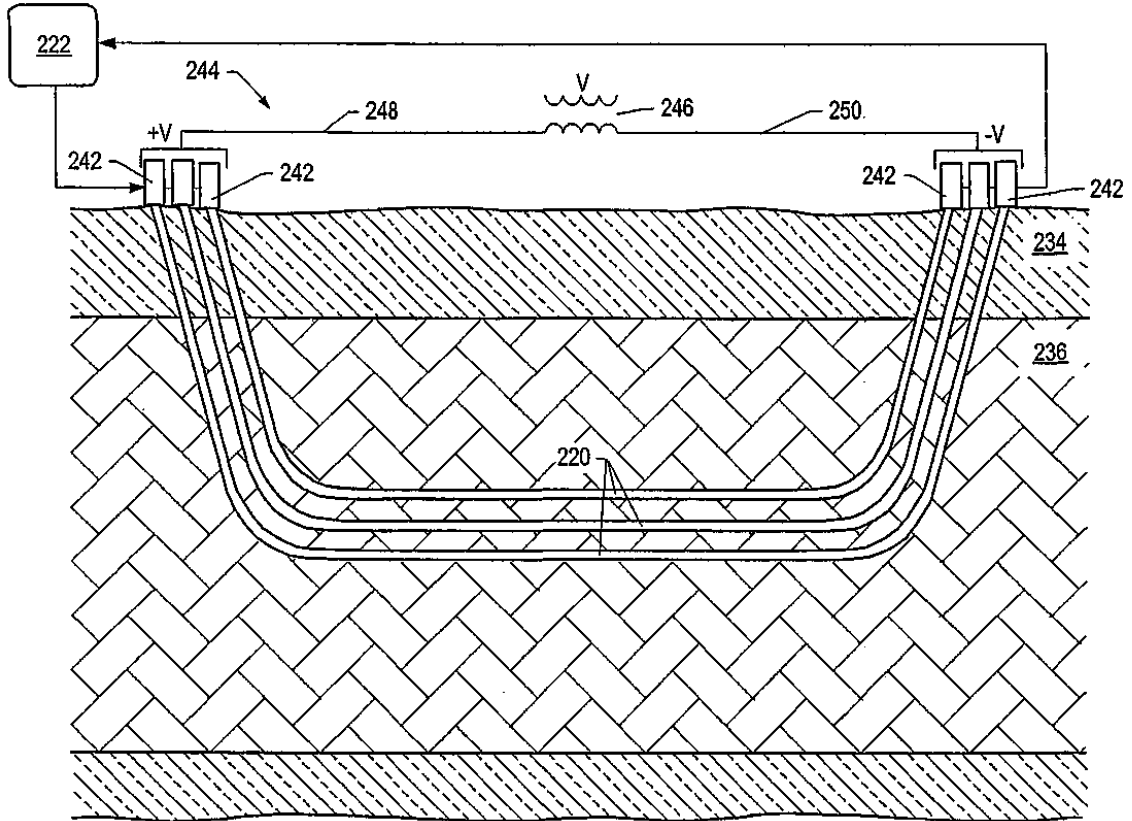
Фиг. 2



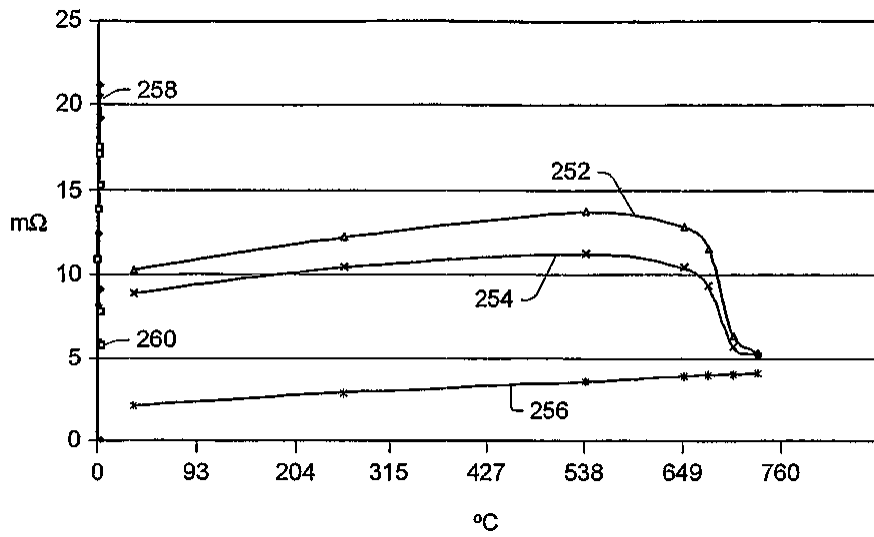
Фиг. 3



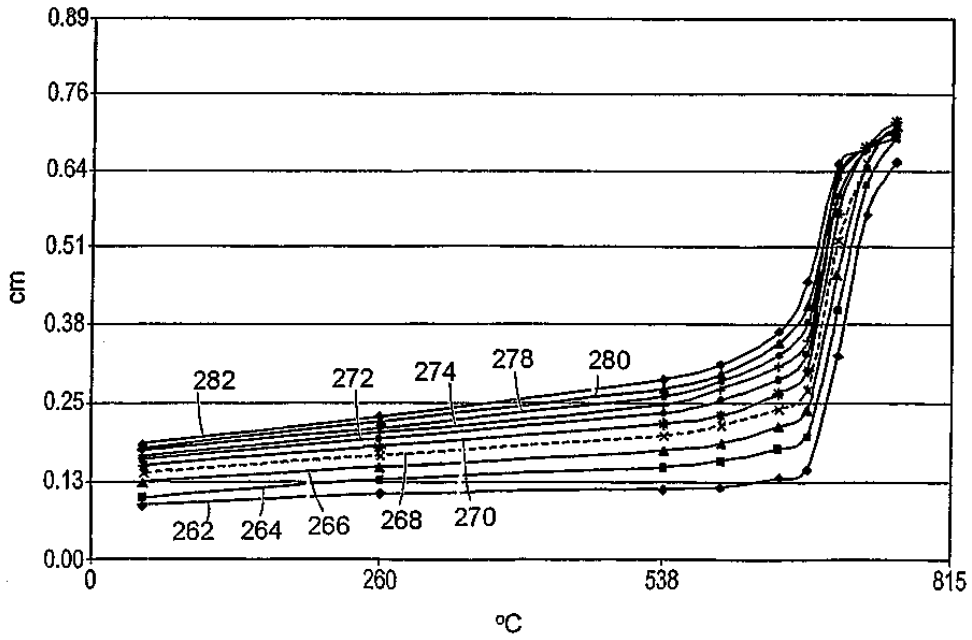
Фиг. 4



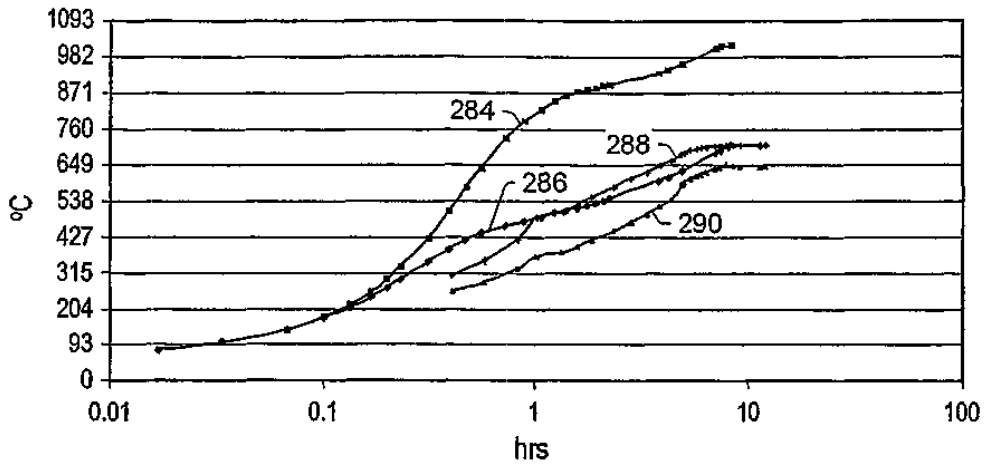
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2