

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11)

014258

(13)

B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации
и выдачи патента: **2010.10.29**

(51) Int. Cl. **E21B 36/04** (2006.01)
E21B 43/24 (2006.01)

(21) Номер заявки: **200702302**

(22) Дата подачи: **2006.04.21**

**(54) НАГРЕВАТЕЛЬ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ, СОДЕРЖАЩИЙ НЕФЕРРО-
МАГНИТНЫЙ ПРОВОДНИК**

(31) **60/674,081**

(56) WO-A-2004097159

(32) **2005.04.22**

US-A1-2004211569

(33) **US**

(43) **2008.04.28**

(86) **PCT/US2006/015106**

(87) **WO 2006/116097 2006.11.02**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ШЕЛЛ ИНТЕРНЭШНЛ РИСЕРЧ МА-
АТСХАППИЙ Б.В. (NL)**

(72) Изобретатель:

**Харрис Кристофер Келвин, Винигар Ха-
ролд Дж. (US)**

(74) Представитель:

Перегудова Ю.Б. (RU)

(57) Предложен нагреватель, содержащий ферромагнитный проводник (242) и электрический проводник (244), электрически соединенный с ферромагнитным проводником. Ферромагнитный проводник расположен относительно электрического проводника таким образом, что электромагнитное поле, создаваемое изменяющимся во времени током в ферромагнитном проводнике, ограничивает протекание большей части электрического тока электрическим проводником при температуре меньше выбранной температуры или близкой к ней.

B1

014258

014258

B1

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение, в общем, касается способов и систем, предназначенных для нагревания и добычи углеводородов, водорода и/или других продуктов из различных пластов, таких как пласты, содержащие углеводороды. Варианты осуществления изобретения касаются нагревателей с ограничением температуры, которые используются для нагревания пластов.

Уровень техники

Углеводороды, добываемые из подземных пластов, часто используют в качестве источников энергии, сырья и потребительской продукции. Беспокойства, связанные с истощением располагаемых ресурсов углеводородов и снижением качества добываемых углеводородов в целом, обуславливают разработку способов более эффективного извлечения, обработки и/или использования имеющихся в распоряжении источников углеводородов. Внутрипластовые процессы могут быть использованы для извлечения углеводородных материалов из пластов подземных месторождений. Может возникнуть необходимость в изменении химических и/или физических свойств углеводородного материала в пласте таким образом, чтобы этот углеводородный материал можно было легче извлечь из подземного пласта. Изменения химических и физических свойств могут включать в себя проводимые в пласте реакции, в результате которых получают извлекаемые флюиды, а также происходят изменения состава, изменения растворимости, изменения плотности, фазовые изменения и/или изменения вязкости углеводородного материала, находящегося в пласте. Флюидом может быть, в частности, газ, жидкость, эмульсия, суспензия и/или поток твердых частиц, которые имеют текучесть, сходную с текучестью жидкости.

Нагреватели для нагревания пласта при осуществлении внутрипластового процесса могут быть размещены в стволах скважин. Примеры внутрипластовых процессов с использованием нагревателей, размещенных в стволе скважины, раскрыты в патентных документах US 2634961 (Ljungstrom), US 2732195 (Ljungstrom), US 2780450 (Ljungstrom), US 2789805 (Ljungstrom), US 2923535 (Ljungstrom) и US 4886118 (Van Meurs et al.)

В патентных документах US 2923535 (Ljungstrom) и US 4886118 (Van Meurs et al.) описано применение нагрева пластов нефтяных сланцев. Нагревание может быть применено к пласту нефтяного сланца с целью осуществления в этом пласте процесса пиролиза керогена. Нагревание также может создать разрыв в пласте для повышения его проницаемости. Повышенная проницаемость может позволить пластовому флюиду перемещаться к эксплуатационной скважине, где этот пластовый флюид извлекается из пласта. В некоторых способах, описанных, например, Ljungstrom для инициирования процесса сжигания, в проницаемый пласт вводят газообразную среду, содержащую кислород, предпочтительно ещё горячую, из ступени предварительного нагрева.

Для нагревания пласта может быть использован источник тепла. При этом для нагревания пласта посредством излучения и/или теплопроводности могут быть использованы электрические нагреватели. Электрический нагреватель может содержать резистивный нагревательный элемент. В патентном документе US 2548360 (Germain) описан электрический нагревательный элемент, размещенный в вязкой нефти в стволе скважины. Этот нагревательный элемент нагревает и разжижает нефть так, чтобы её можно было откачивать из ствола скважины. В документе US 4716960 (Eastlund) описана насосно-компрессорная колонна нефтяной скважины, электрически нагреваемая путем пропускания тока с относительно низким напряжением через насосно-компрессорную колонну для предотвращения образования твердой фазы. В документе US 5065818 (Van Egmond) описан электрический нагревательный элемент, который зацементирован в стволе скважины без обсадной колонны, окружающей нагревательный элемент.

Некоторые нагреватели могут сломаться или выйти из строя из-за наличия в пласте участков местного перегрева. Если температура в какой-либо точке вдоль нагревателя превысит или предположительно превысит максимальную рабочую температуру нагревателя, то для предотвращения выхода из строя нагревателя и/или для исключения перегрева пласта в участках местного перегрева или рядом с ними может потребоваться уменьшение энергии, подаваемой ко всему нагревателю. Некоторые нагреватели могут не обеспечивать одинаковое тепловыделение вдоль длины нагревателя до тех пор, пока не будет достигнута некоторая предельная температура. Некоторые нагреватели не могут эффективно нагревать пласт. Таким образом, целесообразно предложить нагреватель, который обеспечивает одинаковое тепловыделение вдоль длины нагревателя; эффективно нагревает пласт; обеспечивает автоматическую регулировку температуры, когда температура части нагревателя достигает выбранного значения; и/или характеризуется, по существу, линейными магнитными свойствами и высоким коэффициентом мощности при температуре меньше выбранной температуры.

Раскрытие изобретения

Описанные варианты осуществления изобретения касаются, в общем, систем, способов и нагревателей для обработки подземных пластов. Также описанные варианты осуществления изобретения, в общем, касаются нагревателей, содержащих новые компоненты. Такие нагреватели могут быть выполнены с использованием описанных систем и способов.

В некоторых вариантах предлагаются одна или несколько систем, способов и/или нагревателей. В некоторых вариантах системы, способы и/или нагреватели используются для обработки подземного пласта.

В некоторых вариантах предлагается нагреватель, содержащий ферромагнитный проводник и электрический проводник, электрически соединенный с ферромагнитным проводником, при этом ферромагнитный проводник так расположен относительно электрического проводника, что электромагнитное поле, созданное в ферромагнитном проводнике током, изменяющимся во времени, ограничивает протекание большей части электрического тока электрическим проводником при температурах, меньших выбранной температуры или вблизи нее.

В других вариантах признаки конкретных вариантов изобретения могут быть объединены с признаками других вариантов изобретения. Например, признаки одного варианта изобретения могут быть объединены с признаками любого другого варианта изобретения.

В других вариантах изобретения обработка подземного пласта выполняется с использованием любого из описанных способов, систем или нагревателей.

В других вариантах изобретения к описанным конкретным вариантам изобретения могут быть добавлены дополнительные признаки.

Краткое описание чертежей

Достоинства настоящего изобретения понятны специалистам в рассматриваемой области из дальнейшего подробного описания с прилагаемыми чертежами, на которых

фиг. 1 - вид, показывающий этапы нагревания пласта, содержащего углеводороды;

фиг. 2 - схематичный вид варианта осуществления части системы для внутрипластовой конверсии, предназначенной для обработки пласта, содержащего углеводороды;

фиг. 3 - поперечный разрез варианта осуществления источника тепла типа проводник в трубе;

фиг. 4 - поперечный разрез варианта осуществления извлекаемого источника тепла типа проводник в трубе;

фиг. 5 - вариант осуществления нагревателя с ограничением температуры, в котором опорный элемент обеспечивает большую часть тепловой мощности при температурах, меньших температуры Кюри ферромагнитного проводника;

фиг. 6 и 7 - варианты осуществления нагревателей с ограничением температуры, в которых оболочка обеспечивает большую часть тепловой мощности при температурах, меньших температуры Кюри ферромагнитного проводника;

фиг. 8А и 8В - поперечные разрезы варианта осуществления нагревателя с ограничением температуры с тремя соосными проводниками;

фиг. 9 - высокотемпературный вариант осуществления нагревателя с ограничением температуры;

фиг. 10 - вид, показывающий экспериментально полученную зависимость сопротивления от температуры при нескольких значениях тока для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из углеродистой стали и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н;

фиг. 11 - вид, показывающий экспериментально полученные зависимости сопротивления от температуры при нескольких значениях тока для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из сплава железо-кобальт и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н;

фиг. 12 - вид, показывающий экспериментально полученную зависимость коэффициента мощности от температуры при двух значениях переменного тока для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из углеродистой стали и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н;

фиг. 13 - вид, показывающий экспериментально полученную зависимость показателя диапазона изменения от максимальной вводимой мощности для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из углеродистой стали и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н;

фиг. 14 - вид, показывающий примеры зависимости относительной магнитной проницаемости от магнитного поля для полученных взаимосвязей и для исходных данных для углеродистой стали;

фиг. 15 - полученные графики зависимости глубины скин-слоя от магнитного поля для четырех значений температуры и тока 400 А;

фиг. 16 - вид, иллюстрирующий сравнение экспериментальных и численных (вычисленных) результатов для токов 300, 400 и 500 А;

фиг. 17 - вид, показывающий зависимость сопротивления переменному току на фут нагревательного элемента от глубины скин-слоя при 590°C, вычисленную по теоретической модели;

фиг. 18 - вид, показывающий для нагревателя с ограничением температуры зависимость мощности на единицу длины, выделяемой в каждом компоненте нагревателя, от глубины скин-слоя;

фиг. 19А - 19С иллюстрируют для нагревателя с ограничением температуры сравнение результатов теоретических вычислений с экспериментальными данными зависимости сопротивления от температуры.

Несмотря на то что настоящее изобретение допускает различные модификации и альтернативные формы, конкретные варианты осуществления изобретения для примера показаны на чертежах и подроб-

но описаны. Чертежи могут быть выполнены не в масштабе. Тем не менее, надо понимать, что чертежи и подробное описание не ограничивают изобретение и не сводят его к описанной форме, а наоборот, предполагается, что охватываются все модификации, эквиваленты и альтернативы, не выходящие за пределы сущности и объема настоящего изобретения, которое определено в прилагаемой формуле изобретения.

Подробное описание изобретения

Нижеследующее описание в основном относится к системам и способам обработки углеводородов в пластах. Такие пласты могут быть обработаны с целью добычи углеводородных продуктов, водорода и других продуктов.

"Углеводороды" обычно определяют как молекулы, образованные, главным образом, атомами углерода и водорода. Кроме того, углеводороды могут включать в себя и другие химические элементы, такие как галогены, металлы, азот, кислород и/или сера (указанными элементами перечень не ограничен). Углеводородами могут быть (не в качестве ограничения) кероген, битум, пиробитум, нефти, природные минеральные парафины и асфальтиты. Углеводороды могут располагаться в земле в минеральной матрице или вблизи нее. Матрицы могут представлять собой (не в качестве ограничения) осадочные горные породы, песок, силициты, карбонаты, диатомиты и другие пористые среды. "Углеводородные флюиды" - флюиды, содержащие углеводороды. Углеводородные флюиды могут включать, переносить или переноситься в неуглеводородных флюидах, таких как водород, азот, окись углерода, двуокись углерода, сульфид водорода, вода и аммиак.

"Пласт" включает в себя один или большее количество слоев, содержащих углеводороды, один или несколько неуглеводородных слоев, покрывающий слой и/или подстилающий слой. "Покрывающий слой" и/или "подстилающий слой" включают в себя один или более видов непроницаемых материалов. Например, покрывающий слой и/или подстилающий слой могут включать скальную породу, сланцевую глину, агриллит или влажный/плотный карбонат. В некоторых вариантах осуществления внутрипластовых процессов конверсии покрывающий слой и/или подстилающий слой могут включать слой, содержащий углеводороды, или слои, содержащие углеводороды, которые являются относительно непроницаемыми и не подвержены воздействию температур при процессе конверсии в пласте, что приводит к значительным изменениям свойств слоев, содержащих углеводороды, в покрывающем и/или подстилающем слое. Например, подстилающий слой может содержать сланцевую глину или агриллит, но подстилающий слой не допускается до нагрева до температур пиролиза во время проведения процесса конверсии в пласте. В ряде случаев покрывающий слой и/или подстилающий слой могут быть, в некоторой степени, проницаемыми.

"Источником тепла" является любая система, обеспечивающая тепло по меньшей мере для части пласта, по существу, за счёт теплопроводности и(или) излучения. Например, источник тепла может включать в себя электронагреватели, такие как изолированный проводник, протяжённый элемент и(или) проводник, расположенный в трубе. Источник тепла может также включать в себя системы, которые вырабатывают тепло путём сжигания топлива, находящегося вне пласта или в пласте. Эти системы могут быть поверхностными горелками, скважинными газовыми горелками, беспламенными распределёнными камерами сгорания и естественными распределёнными камерами сгорания. В некоторых применениях тепло, подводимое или выработанное в одном или нескольких тепловых источниках, может подводиться от других источников энергии. Другие источники энергии могут непосредственно нагревать пласт или энергия может передаваться теплоносителю, который прямо или косвенно нагревает пласт. Понятно, что один или несколько тепловых источников, которые нагревают пласт, могут использовать различные источники энергии. Таким образом, например, для заданного пласта некоторые источники тепла передают тепло от электрических резистивных нагревателей, некоторые источники тепла могут обеспечивать тепло за счёт сжигания топлива, а некоторые источники тепла могут получать тепло от одного или нескольких других источников энергии (например, за счёт химических реакций, солнечной энергии, ветровой энергии, биомассы или других источников возобновляемой энергии). Химическая реакция может включать в себя экзотермическую реакцию (например, реакция окисления). Источник тепла может также включать в себя нагреватель, который обеспечивает нагрев в зоне, ближайшей к нагреваемому месту и(или) окружающей его, такой как нагревательная скважина.

"Нагреватель" представляет собой любую систему или источник тепла, предназначенный для выделения теплоты в скважине или вблизи зоны нахождения ствола скважины. Нагревателями могут служить (не в качестве ограничения изобретения) электрические нагреватели, горелки, камеры сгорания и/или их комбинации, которые взаимодействуют с материалом, содержащимся в пласте или извлеченным из пласта.

Понятие "внутрипластовый процесс конверсии" относится к процессу нагревания пласта, содержащего углеводороды, с помощью источников тепла с целью подъема температуры по меньшей мере части пласта выше температуры пиролиза, в результате чего в пласте получают пиролизный флюид.

Понятие "изолированный проводник" относится к любому протяженному материалу, который способен проводить электрический ток и который покрыт сверху целиком или частично электроизоляционным материалом.

Протяженный элемент может быть оголенным металлическим нагревателем или неизолированным

металлическим нагревателем. Понятия "оголенный металл" и "неизолированный металл" относятся к металлам, которые на снабжены слоем электрической изоляции, например минеральной изоляцией, которая предназначена для обеспечения электрической изоляции металла во всем рабочем интервале температур указанного протяженного элемента. Понятия "оголенный металл" и "неизолированный металл" могут распространяться на металл, который содержит ингибитор коррозии, например оксидный слой, образованный естественным путем, специально нанесенный оксидный слой и/или пленка. "Оголенный металл" и "неизолированный металл" включают в себя металлы с электрической изоляцией из полимера или с изоляцией другого типа, которая не может сохранять электроизоляционные свойства при типичных рабочих температурах протяженного элемента. Такой изоляционный материал может быть размещен на металле, и под действием высокой температуры его свойства могут ухудшаться в процессе использования нагревателя.

Понятие "нагреватель с ограничением температуры", как правило, относится к нагревателю, который регулирует тепловую мощность (например, уменьшает величину тепловой мощности) при температурах, превышающих заданную, без использования внешнего регулирования, осуществляемого, например, с помощью регуляторов температуры, регуляторов мощности, выпрямителей или других устройств. Нагревателями с ограничением температуры могут служить резистивные электрические нагреватели, которые питаются энергией переменного тока (AC) или модулированного (например, прерывистого) постоянного тока (DC).

"Температура Кюри" представляет собой такую температуру, выше которой ферромагнитный материал теряет все свои ферромагнитные свойства. Помимо потери всех своих ферромагнитных свойств при температуре выше температуры Кюри, ферромагнитный материал начинает терять свои ферромагнитные свойства в случае пропускания через него повышенного электрического тока.

Понятие "изменяющийся во времени ток" относится к электрическому току, который производит в ферромагнитном проводнике электрический скин-эффект и имеет величину, изменяющуюся во времени.

Понятие "переменный ток (AC)" относится к изменяющемуся во времени току, направление которого на обратное изменяется, по существу, синусоидально. При протекании AC в ферромагнитном проводнике возникает скин-эффект.

Понятие "модулированный постоянный ток" (Dd) относится к любому, по существу, не синусоидальному, изменяющемуся во времени току, который создает в ферромагнитном проводнике электрический скин-эффект.

"Показатель диапазона изменения" нагревателей с ограничением температуры представляет собой отношение наибольшего сопротивления переменному току или модулированному постоянному току при температуре ниже температуры Кюри к наименьшему сопротивлению при температуре выше температуры Кюри для заданного тока.

В контексте нагревательных систем, устройств и способов с уменьшенной тепловой мощностью термин "автоматически" означает, что такие системы, устройства и способы работают определенным образом без использования внешнего регулирования (например, внешних регуляторов, таких как регулятор с датчиком температуры и контуром обратной связи, ПИД-регулятор или регулятор с упреждением).

Термин "ствол скважины" относится к отверстию в пласте, образованному путем бурения или внедрения в пласт трубы. Ствол скважины может иметь, по существу, круговое поперечное сечение или поперечное сечение другой формы. Используемые здесь термины "скважина" и "отверстие", когда они относятся к образованному в пласте отверстию, могут быть использованы взаимозаменяемым образом с термином "ствол скважины".

Углеводороды, содержащиеся в пластах, можно обрабатывать различными путями в целях получения большого количества различных продуктов. В определенных вариантах осуществления содержащиеся в пластах углеводороды обрабатывают постадийно. На фиг. 1 отображены стадии нагревания пласта, содержащего углеводороды. Фиг. 1 иллюстрирует также пример добычи ("Y") из пласта эквивалента нефти в баррелях на тонну (ось y) пластовых флюидов в зависимости от температуры ("T") нагретого пласта в градусах Цельсия (ось x).

На стадии 1 нагревания происходит десорбция метана и испарение воды. Нагревание пласта на стадии 1 может осуществляться очень быстро. Например, при начальном нагревании пласта, содержащего углеводороды, углеводороды в пласте десорбируют адсорбированный метан. Десорбированный метан может добываться из пласта. При дальнейшем нагревании пласта происходит испарение воды, содержащейся в углеводородсодержащем пласте. В некоторых пластах, содержащих углеводороды, на долю воды может приходиться от 10 до 50% объема пор, имеющихся в пласте. Обычно находящаяся в пласте вода испаряется при температуре от 160 до 285°C и абсолютном давлении в интервале от 600 до 7000 кПа. В некоторых вариантах осуществления испаренная вода способствует изменению смачиваемости в пласте и/или повышает пластовое давление. Эти изменения смачиваемости и/или повышенное давление могут инициировать в пласте реакции пиролиза или другие реакции. В определенных вариантах осуществления из пласта добывают испаренную воду. В других вариантах осуществления испаренную воду используют для проведения паровой экстракции и/или паровой дистилляции в самом пласте или вне пласта. Удаление воды из объема пор и увеличение этого объема в пласте приводит к увеличению про-

странства для содержания углеводородов в объеме пор.

В определенных вариантах осуществления после стадии 1 нагревания производят дальнейшее нагревание пласта так, что пластовая температура достигает (по меньшей мере) температуры начала пиролиза (температуры в нижнем конце температурного интервала, показанного как стадия 2). Углеводороды, находящиеся в пласте, могут быть пиролизированы в продолжение стадии 2. Интервал температур процесса пиролиза изменяется в зависимости от видов углеводородов, содержащихся в пласте. При этом интервал температур пиролиза может включать температуры от 250 до 900°C. Для производства желательных продуктов интервал температур пиролиза может включать только некоторую часть всего интервала температур пиролиза. В некоторых вариантах осуществления интервал температур пиролиза для получения желательных продуктов может включать температуры от 250 до 400°C или температуры от 270 до 350°C. Если температура углеводородов в пласте медленно повышается в пределах интервала температур от 250 до 400°C, производство продуктов пиролиза может быть, по существу, завершено при достижении температуры 400°C. Для получения желательных продуктов среднюю температуру углеводородов в интервале температур пиролиза можно повышать со скоростью менее 5°C в день, менее чем 2°C в день, менее 1°C в день или менее 0,5°C в день. В результате прогрева пласта, содержащего углеводороды, с помощью большого количества источников тепла вокруг этих источников тепла могут создаваться температурные градиенты, за счет которых температура углеводородов в пласте медленно повышается, находясь в пределах интервала температур пиролиза.

Скорость повышения температуры в интервале температур пиролиза для желательных продуктов может оказывать влияние на качество и количество пластовых флюидов, получаемых из углеводородсодержащего пласта. За счет медленного подъема температуры в пределах интервала температур пиролиза желательных продуктов можно сдерживать подвижность в пласте молекул с большими цепями. Медленно повышая температуру в пределах интервала температур пиролиза желательных продуктов, можно ограничивать реакции между подвижными углеводородами, которые производят нежелательные продукты. Медленный подъем температуры в пределах интервала температур пиролиза желательных продуктов позволяет добывать из пласта продукты высокого качества, с высокой плотностью в градусах Американского нефтяного института. Кроме того, медленный подъем температуры в пределах интервала температур пиролиза желательных продуктов позволяет извлекать в качестве углеводородного продукта большое количество находящихся в пласте углеводородов.

В некоторых вариантах осуществления внутрипластовой конверсии часть пласта нагревают до желательной температуры вместо медленного повышения температуры в некотором интервале температур от его начала до конца. В некоторых вариантах осуществления желательная температура составляет 300, 325 или 350°C. В качестве желательных могут быть выбраны и другие температуры. Суперпозиция теплоты, получаемой пластом от источников тепла, позволяет относительно быстро и эффективно установить в желательную пластовую температуру. Подвод энергии в пласт от источников тепла можно регулировать для поддержания пластовой температуры в основном на уровне желательной температуры. Нагретую часть пласта поддерживают, по существу, при желательной температуре до тех пор, пока интенсивность процесса пиролиза не уменьшится до такой степени, что добыча желательных пластовых флюидов из пласта станет экономически не выгодной. Части пласта, которые подвергаются пиролизу, могут включать в себя зоны, нагретые до температур, находящихся в пределах интервала температур пиролиза, за счет передачи теплоты только от одного источника тепла.

В определенных вариантах осуществления из пласта добывают пластовые флюиды, включающие в себя пиролизные флюиды. По мере увеличения температуры пласта количество конденсируемых углеводородов, содержащихся в добываемых пластовых флюидах, может уменьшаться. При высоких температурах пласт может производить главным образом метан и/или водород. Если углеводородсодержащий пласт нагревают с прохождением всего интервала температур пиролиза, при приближении к верхнему пределу интервала температур пиролиза пласт может выделять лишь небольшое количество водорода. В конце концов доступный водород истощается, при этом, как правило, количество получаемых из пласта флюидов будет минимальным.

По окончании процесса пиролиза углеводородов в пласте ещё может находиться большое количество углерода и некоторое количество водорода. Значительная часть углерода, остающегося в пласте, может быть добыта из пласта в виде синтез-газа. Образование синтез-газа может происходить на стадии 3 нагревания, изображенной на фиг. 1. Стадия 3 может включать нагревание пласта, содержащего углеводороды, до температуры, достаточной для образования синтез-газа. Например, синтез-газ может быть получен в интервалах температур от 400 до 1200°C, от 500 до 1100°C или от 550 до 1000°C. При этом состав синтез-газа, произведенного в пласте, определяется температурой нагреваемой части пласта при вводе в пласт текучей среды, необходимой для образования синтез-газа. Образовавшийся синтез-газ может быть извлечен из пласта через эксплуатационную скважину или эксплуатационные скважины.

Общее энергосодержание флюидов, добываемых из углеводородсодержащего пласта, может оставаться относительно постоянным в течение всего процесса пиролиза и генерирования синтез-газа. В процессе пиролиза при относительно низких температурах пласта значительная часть полученных флюидов может представлять собой конденсируемые углеводороды, которые имеют высокое энергосодержание.

Однако при более высоких температурах пиролиза пластовые флюиды могут содержать меньше углеводородов. Из пласта может быть извлечено больше неконденсируемых углеводородов. При этом во время образования преимущественно неконденсируемых пластовых флюидов энергосодержание на единицу объема полученных флюидов может слегка уменьшиться. В процессе генерирования синтез-газа энергосодержание полученного синтез-газа на единицу объема значительно снижается по сравнению с энергосодержанием пиролизного флюида. Однако объем произведенного синтез-газа во многих случаях будет значительно увеличиваться.

На фиг. 2 схематически представлен вариант осуществления части системы для проведения внутрипластовой конверсии, предназначенной для обработки пласта, содержащего углеводороды. Указанная система для проведения внутрипластовой конверсии включает в себя барьерные скважины 200. Эти барьерные скважины 200 используют для образования барьера вокруг зоны обработки. Барьер препятствует прохождению потока флюидов в зону и/или из зоны обработки. Барьерные скважины включают в себя (но не в качестве ограничения) водопонижающие скважины, скважины для вакуумирования, скважины для улавливания, нагнетательные скважины, скважины для цементирования, скважины для замораживания или их комбинации. В некоторых вариантах осуществления барьерные скважины 200 представляют собой водопонижающие скважины. Водопонижающие скважины могут обеспечивать удаление жидкой фазы воды и/или предотвращение поступления жидкой фазы воды в некоторую часть нагреваемого пласта или к нагреваемому пласту. В варианте осуществления, представленном на фиг. 2, барьерные скважины 200 показаны проходящими только с одной стороны от источников 202 тепла, но обычно барьерные скважины окружают все используемые источники 202 тепла или те, которые предполагается использовать для прогрева зоны обработки пласта.

Источники 202 тепла размещают по меньшей мере в части пласта. Эти источники 202 тепла могут включать в себя нагреватели, например изолированные нагреватели, нагреватели типа "проводник в трубе", поверхностные камеры сгорания, беспламенные распределенные камеры сгорания и/или распределенные естественные камеры сгорания. Источниками 202 тепла могут быть и другие типы нагревателей. Источники 202 тепла обеспечивают подвод теплоты по меньшей мере к части пласта для нагревания содержащихся в пласте углеводородов. Энергию к источникам 202 тепла можно подводить с помощью подводящих линий 204. Подводящие линии 204 могут конструктивно отличаться друг от друга в зависимости от типа источника тепла или источников тепла, используемых для нагревания пласта. Подводящие линии 204 для источников тепла могут передавать электрическую энергию электрическим нагревателям, могут транспортировать топливо для камер сгорания или могут транспортировать теплоноситель, который циркулирует в пласте.

Для извлечения пластовых флюидов из пласта используют эксплуатационные скважины 206. В некоторых вариантах осуществления эксплуатационные скважины 206 могут быть снабжены одними или большим количеством источников тепла. Источник тепла, размещенный в эксплуатационной скважине, может нагревать одну или более чем одну часть пласта вблизи эксплуатационной скважины или может осуществлять нагревание в самой эксплуатационной скважине. Источник тепла, размещенный в эксплуатационной скважине, может предотвращать конденсацию и отток пластового флюида, подлежащего извлечению из пласта.

Добываемый пластовый флюид можно транспортировать из эксплуатационной скважины 206 по коллекторному трубопроводу 208 к оборудованию 210 для его обработки. Кроме того, пластовые флюиды могут добываться из самого источника 202 тепла. Например, флюид может добываться из источников 202 тепла для регулирования давления в пласте вблизи места расположения источников тепла. Флюид, добытый из источников тепла 202, может быть транспортирован через насосно-компрессорную колонну или систему трубопроводов в коллекторный трубопровод 208, или же полученный флюид может быть транспортирован через насосно-компрессорную колонну или систему трубопроводов непосредственно в оборудование 210 для обработки. Указанное оборудование 210 для обработки может включать сепараторы, реакционные аппараты, аппараты для повышения качества добытого продукта, топливные элементы, турбины, ёмкости для хранения и/или другие системы и аппараты для обработки добываемых пластовых флюидов. Оборудование для обработки может производить транспортное топливо по меньшей мере из части углеводородов, добытых из пласта.

Нагреватели с ограничением температуры могут иметь такое конструктивное выполнение и/или могут включать в себя такие материалы, которые при определенных температурах автоматически придают нагревателю свойства, ограничивающие температуру. В определенных вариантах осуществления в конструкции нагревателей с ограничением температуры используют ферромагнитные материалы. Ферромагнитные материалы при приложении к ним изменяемого во времени электрического тока могут самопроизвольно ограничивать температуру при температуре Кюри или вблизи температуры Кюри материала для получения уменьшенного количества теплоты при температуре Кюри или вблизи этой температуры. В определенных вариантах осуществления ферромагнитный материал при заданной температуре, которая приблизительно соответствует температуре Кюри, ограничивает температуру нагревателя с ограничением температуры. В определенных вариантах осуществления заданная температура отличается от температуры Кюри в пределах 35°C, в пределах 25, 20 или 10°C. В определенных вариантах осуществле-

ния ферромагнитные материалы соединяют с другими материалами (например, с материалами, имеющими высокую электропроводность, с высокопрочными материалами, с коррозионно-стойкими материалами или комбинациями этих материалов) для того, чтобы получить различные электрические и/или механические свойства. Некоторые участки нагревателя с ограничением температуры могут иметь более низкое сопротивление (обусловленное различной геометрией и/или за счет использования различных ферромагнитных и/или неферромагнитных материалов) по сравнению с сопротивлением других участков нагревателя. Наличие в нагревателе с ограничением температуры участков из различных материалов и/или с различными размерами позволяет получить желательную тепловую мощность от каждого участка нагревателя.

Нагреватели с ограничением температуры могут быть более надежными, чем другие нагреватели. Нагреватели с ограничением температуры могут быть менее подвержены разрушению или повреждению вследствие наличия участков перегрева в пласте. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры обеспечивают, по существу, равномерный прогрев пласта. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры способны нагревать пласт более эффективно за счет работы при более высокой средней тепловой мощности по всей длине нагревателя. Нагреватели с ограничением температуры работают при более высокой средней тепловой мощности по всей длине нагревателя, поскольку электрическая мощность, подводимая к нагревателю, не должна уменьшаться для всего нагревателя, как это происходит в типичных нагревателях постоянной мощности, если температура в какой-либо точке нагревателя превышает или должна превысить максимальную рабочую температуру нагревателя. Тепловая мощность, отводимая от участков нагревателя с ограничением температуры, с приближением к температуре Кюри нагревателя автоматически уменьшается без управляемого изменения изменяющегося во времени электрического тока, подаваемого в нагреватель. Тепловая мощность автоматически уменьшается вследствие изменения электрических свойств (например, электрического сопротивления) участков нагревателя с ограничением температуры. Поэтому к нагревателю с ограничением температуры в течение большей части процесса нагревания подводится большая мощность.

В определенных вариантах осуществления система, содержащая нагреватели с ограничением температуры, первоначально обеспечивает первую тепловую мощность и затем обеспечивает уменьшенную тепловую мощность (вторую тепловую мощность) электрически резистивного участка нагревателя вблизи температуры Кюри, при этой температуре или выше неё, когда нагреватель с ограничением температуры запитывается изменяющимся во времени током. Первая тепловая мощность представляет собой тепловую мощность при температурах ниже температуры, при которой нагреватель с ограничением температуры начинает функционировать с самоограничением. В некоторых вариантах осуществления первая тепловая мощность соответствует температуре, которая на 50, 75, 100 или 125°C ниже температуры Кюри ферромагнитного материала в нагревателе с ограничением температуры.

Нагреватель с ограничением температуры может запитываться энергией изменяющегося во времени тока (переменный ток или модулированный постоянный ток), подводимого в ствол скважины. Ствол скважины может содержать источник энергии и другие комплектующие (например, модулирующие элементы, трансформаторы и/или конденсаторы), используемые при подводе электрической энергии к нагревателю с ограничением температуры. При этом для нагревания некоторой части пласта может быть использован один или большое количество нагревателей с ограничением температуры.

В определенных вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры содержит электрический проводник, который при подводе к нему изменяющегося во времени тока работает как нагреватель со скин-эффектом или близким к нему эффектом. Указанный скин-эффект ограничивает глубину проникновения тока во внутренний объем проводника. Для ферромагнитных материалов скин-эффект преобладает благодаря магнитной проницаемости проводника. Относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов, как правило, находится в интервале от 10 до 1000 (например, относительная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов, как правило, равна по меньшей мере 10 и может быть равной по меньшей мере 50, 100, 500, 1000 или больше). Если температура ферромагнитного материала повышается до температуры выше температуры Кюри и/или и если увеличивается приложенный электрический ток, магнитная проницаемость ферромагнитного материала существенным образом уменьшается, и глубина скин-слоя быстро увеличивается (например, глубина скин-слоя увеличивается обратно пропорционально корню квадратному из магнитной проницаемости). Уменьшение магнитной проницаемости приводит к уменьшению электрического сопротивления проводника переменному току или модулированному постоянному току при температуре, равной, превышающей или находящейся вблизи температуры Кюри, и/или при увеличении подводимого электрического тока. В том случае, когда нагреватель с ограничением температуры питается энергией от источника, по существу, постоянного тока, участки нагревателя, температура которых приближается к температуре Кюри, или достигает или превышает эту температуру, могут иметь пониженное рассеивание теплоты. На тех участках нагревателя с ограничением температуры, которые не достигли или не приблизились к температуре Кюри, может преобладать нагревание за счет скин-эффекта, что обеспечивает в нагревателе высокое рассеивание теплоты благодаря более высокой активной нагрузке.

Преимущество использования нагревателя с ограничением температуры для нагревания углеводородов в пласте заключается в том, что проводник выбирается таким, чтобы его температура Кюри находилась в желательном диапазоне рабочих температур. Функционирование нагревателя в пределах диапазона желательных рабочих температур позволяет осуществлять ввод в пласт значительного количества теплоты при поддержании температуры нагревателя с ограничением температуры и другого оборудования ниже расчетной предельной величины температуры. Расчетными предельными температурами являются температуры, при которых неблагоприятным образом проявляются такие свойства, как коррозия, ползучесть и/или деформация. Свойства ограничения температуры, присущие нагревателю с ограничением температуры, позволяют предотвратить перегрев или перегорание нагревателя вблизи мест перегрева в пласте, имеющих низкую теплопроводность. В некоторых вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры способен понижать или управлять тепловой мощностью и/или выдерживать нагревание при температурах выше 25, 37, 100, 250, 500, 700, 800, 900°C или при более высоких температурах вплоть до 1131°C в зависимости от используемых в нагревателе материалов.

Нагреватель с ограничением температуры позволяет подводить в пласт большее количество теплоты, чем нагреватели постоянной мощности, поскольку для нагревателя с ограничением температуры отсутствует необходимость ограничения подвода энергии, связанного с наличием зон с низкой теплопроводностью, прилегающих к этому нагревателю. Например, в нефтяном сланце на Грин-Ривер существует различие по меньшей мере в три раза между теплопроводностью самых низких и самых верхних слоев богатых нефтяных сланцев. При нагревании такого пласта с помощью нагревателя с ограничением температуры пласту передается существенно больше теплоты, чем при использовании известного нагревателя, тепловая мощность которого ограничена температурой, которую имеют слои с низкой теплопроводностью. Для известного нагревателя необходимо, чтобы тепловая мощность вдоль всей его длины соответствовала слоям с низкой теплопроводностью с тем, чтобы нагреватель в этих слоях, имеющих низкую теплопроводность, не перегревался и не перегорал. В случае нагревателя с ограничением температуры тепловая мощность для близлежащих слоев с низкой теплопроводностью, которые имеют высокую температуру, будет уменьшена, но остальные участки нагревателя с ограничением температуры, которые не находятся при высокой температуре, будут обеспечивать высокую тепловую мощность. Поскольку нагреватели, предназначенные для нагревания углеводородсодержащих пластов, имеют большую длину (например, по меньшей мере 10, 100, 300 м, по меньшей мере 500 м, 1 км или более, вплоть до 10 км), то большая часть длины нагревателя с ограничением температуры может функционировать при температуре ниже температуры Кюри, в то время как лишь немногие участки нагревателя с ограничением температуры находятся при температуре Кюри или близкой к ней.

Использование нагревателей с ограничением температуры позволяет осуществлять эффективную передачу теплоты к пласту. Эффективная передача теплоты позволяет уменьшить время, необходимое для нагревания пласта до желательной температуры. Например, для процесса пиролиза в нефтяном сланце на Грин-Ривер при размещении скважин с нагревателями, размещенными на расстоянии 12 м друг от друга, и использовании при этом известных нагревателей постоянной мощности требуется проводить нагревание в течение от 9,5 до 10 лет. При таком же размещении нагревателей с ограничением температуры могут обеспечить большую среднюю тепловую мощность при поддержании температуры нагревательного оборудования ниже предельной расчетной температуры для этого оборудования. При большей средней тепловой мощности, которую обеспечивают нагреватели с ограничением температуры, пиролиз в пласте может происходить раньше, чем при меньшей средней тепловой мощности, которую обеспечивают известные нагреватели постоянной мощности. Например, при использовании нагревателей с ограничением температуры при размещении нагревательных скважин на расстоянии 12 м процесс пиролиза в нефтяном сланце на Грин-Ривер может происходить в течение 5 лет. Нагреватели с ограничением температуры нейтрализуют места перегрева, которые образуются вследствие неточного размещения или бурения скважин, в результате чего нагревательные скважины подходят друг к другу слишком близко. В определенных вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры обеспечивают повышенную тепловую мощность в нагревательных скважинах, расположенных слишком далеко друг от друга, или они ограничивают тепловую мощность для нагревательных скважин, которые расположены слишком близко друг от друга. Нагреватели с ограничением температуры, кроме того, подводят большее количество энергии в зоны, прилегающие к покрывающему слою и подстилающему слою с тем, чтобы компенсировать тепловые потери в этих зонах.

Нагреватели с ограничением температуры с успехом могут быть использованы в пластах многих типов. Например, в пластах с битуминозными песками или в относительно проницаемых пластах, содержащих тяжелые углеводороды, нагреватели с ограничением температуры могут быть использованы для обеспечения регулируемой тепловой мощности при низкой температуре для уменьшения вязкости пластовых флюидов, повышения подвижности флюидов и для увеличения радиальных потоков флюидов вблизи или у ствола скважины или в пласте. Нагреватели с ограничением температуры могут быть использованы для предотвращения избыточного коксообразования, обусловленного перегревом зоны пласта, расположенной вблизи ствола скважины.

Применение нагревателей с ограничением температуры в некоторых вариантах осуществления ис-

ключает или уменьшает необходимость использования дорогостоящих схем регулирования температуры. Например, применение нагревателей с ограничением температуры исключает или снижает необходимость проведения термокаротажа ствола скважины и/или необходимость использования стационарных термодар, установленных на нагревателях для непрерывного контроля их возможного перегрева в месте нахождения горячих пятен.

В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры более экономичны с точки зрения изготовления, чем обычные нагреватели. Типичные ферромагнитные материалы включают железо, углеродистую сталь или ферритную нержавеющую сталь. Такие материалы являются недорогими по сравнению с теплопроводными сплавами на основе никеля (такими как нихром, Kanthal™ (Bulten-Kanthal AB, Sweden) и/или LOHM™ (Driver-Harris Company, New Jersey, U.S.A.)), которые обычно используют в нагревателях с изолированным проводником (провод с минеральной изоляцией). В одном варианте осуществления нагревателя с ограничением температуры для уменьшения стоимости и повышения надежности он изготовлен из непрерывных отрезков как нагреватель с изолированным проводником.

Нагреватели с ограничением температуры могут использоваться для нагревания содержащих углеводороды пластов, включая, помимо прочего, пласты нефтеносного сланца, угольные пласты, пласты нефтеносного песка и тяжелые вязкие нефти. Также нагреватели с ограничением температуры могут быть использованы в области улучшения состояния окружающей среды для испарения или разложения загрязняющих почву веществ. Варианты нагревателей с ограничением температуры могут использоваться для нагревания флюидов в стволе скважины или в подводном трубопроводе для сдерживания осаждения парафина или различных гидратов. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры используются для добычи из подземных пластов с помощью растворения (например, пласта нефтеносных сланцев или угольного пласта). В некоторых вариантах осуществления флюид (например, солевой расплав) расположен в стволе скважины и нагревается с помощью нагревателя с ограничением температуры с целью противодействия деформации и/или разрушению ствола скважины. В некоторых вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры прикрепляется к насосной штанге в стволе скважины или сам является частью насосной штанги. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры используются для нагревания области, прилегающей к стволу скважины, что делается для уменьшения вязкости нефти рядом со стволом скважины при добыче вязкой сырой нефти и при транспортировке вязкой нефти на поверхность. В некоторых вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры позволяют осуществлять газифиционную добычу вязкой нефти благодаря снижению вязкости нефти без ее коксования. Нагреватели с ограничением температуры могут использоваться в линиях транспортировки серы для поддержания температуры в пределах примерно от 110 до примерно 130°C.

Некоторые варианты осуществления нагревателей с ограничением температуры могут быть использованы в химических или нефтеперерабатывающих процессах при повышенных температурах, где для предотвращения нежелательных химических реакций или предотвращения ущерба от локального увеличения температуры требуется регулировка в узком температурном диапазоне. Указанные нагреватели могут использоваться, помимо прочего, в трубках реакционных аппаратов, установках для коксования и дистилляционных колоннах. Также нагреватели с ограничением температуры могут использоваться в устройствах контроля загрязнения окружающей среды (например, в каталитических конвертерах и окислительных аппаратах) для обеспечения быстрого нагревания с целью управления температурой без использования сложных схем регулирования температуры. Кроме того, нагреватели с ограничением температуры могут использоваться при производстве пищевых продуктов для предотвращения порчи пищевых продуктов из-за воздействия слишком высоких температур. Также нагреватели с ограничением температуры могут использоваться при тепловой обработке металлов (например, отжиге сварных швов). Также нагреватели с ограничением температуры могут использоваться в обогревателях полов, приборах для прижигания и/или в различных других устройствах. Нагреватели с ограничением температуры могут использоваться с биопсийными иглами с целью разрушения опухолей благодаря повышению температуры живого организма.

Некоторые варианты осуществления нагревателей с ограничением температуры могут быть полезны в некоторых типах медицинских и/или ветеринарных приборов. Например, нагреватель с ограничением температуры может использоваться для терапевтической обработки ткани человека или животного. Нагреватель с ограничением температуры медицинского или ветеринарного прибора может содержать ферромагнитный материал, включая сплав палладия и меди, температура Кюри которого равна примерно 50°C. Для запитки нагревателя с ограничением температуры и с относительно невысокой температурой, который используется в медицинских и/или ветеринарных целях, может использоваться высокая частота (например, частота, превосходящая примерно 1 МГц).

Ферромагнитный сплав или ферромагнитные сплавы, используемые в нагревателе с ограничением температуры, определяют температуру Кюри для нагревателя. Данные по температуре Кюри для различных металлов представлены в справочнике "American Institute of Physics Handbook", Second Edition, McGraw-Hill, p. 5-176. Ферромагнитные проводники могут включать в себя один или более ферромаг-

нитных химических элементов (железо, кобальт, никель) и/или сплавы этих элементов. В некоторых вариантах осуществления ферромагнитные проводники включают сплавы никеля с хромом (Fe-Cr), которые содержат вольфрам (W), например сплавы марки HCM12A SAVE12 (Sumimoto Metals Co, Japan) и/или сплавы железа, содержащие хром (например, сплавы Fe-Cr, сплавы Fe-Cr-W, сплавы Fe-Cr-V (ванадий), сплавы Fe-Cr-Nb). Из указанных выше трех основных ферромагнитных элементов железо имеет температуру Кюри, равную 770°C, кобальт (Co) имеет температуру Кюри 1131°C и никель имеет температуру Кюри, приблизительно равную 358°C. Температура Кюри сплава железа с кобальтом выше, чем температура Кюри железа. Например, температура Кюри сплава железа с кобальтом, содержащего 2 мас.% кобальта, составляет 800°C; сплав железа с кобальтом, содержащий 12 мас.% кобальта, имеет температуру Кюри, равную 900°C; температура Кюри сплава железа с кобальтом, содержащего 20 мас.% кобальта, равна 950°C. Температура Кюри сплава железа с никелем ниже, чем температура Кюри железа. Например, сплав железа с никелем, содержащий 20 мас.% никеля, имеет температуру Кюри, равную 720°C; сплав железа с никелем, содержащий 60 мас.% кобальта, имеет температуру Кюри, равную 560°C.

Некоторые неферромагнитные элементы, используемые в сплавах, повышают температуру Кюри железа. Например, сплав железа с ванадием, содержащий 5,9 мас.% ванадия, имеет температуру Кюри приблизительно равную 815°C. Другие неферромагнитные элементы (например, углерод, алюминий, медь, кремний и/или хром) для понижения температуры Кюри могут образовать сплав с железом или другими ферромагнитными металлами. Неферромагнитные материалы, которые повышают температуру Кюри, могут быть скомбинированы с неферромагнитными материалами, которые снижают температуру Кюри, и могут образовать сплавы с железом или другими ферромагнитными материалами для получения материала с желательной температурой Кюри и другими желательными физическими и/или химическими свойствами. В некоторых вариантах осуществления материал с температурой Кюри представляет собой феррит, например NiFe_2O_4 . В других вариантах осуществления материал с температурой Кюри представляет собой бинарное соединение, например FeNi_3 или Fe_3Al .

Определенные варианты осуществления нагревателей с ограничением температуры могут включать более чем один ферромагнитный материал. Такие варианты осуществления находятся в пределах объема описанных здесь вариантов осуществления, если какие-либо раскрытые здесь условия применить по меньшей мере к одному из ферромагнитных материалов, используемых в нагревателе с ограничением температуры.

Обычно по мере приближения к температуре Кюри ферромагнитные свойства ослабевают. В справочнике "Handbook of Electrical Heating for Industry" by C. James Erickson (IEEE Press, 1995) приведена типичная кривая для стали, содержащей 1% углерода (1 мас.% C). Ослабление магнитной проницаемости начинается при температуре выше 650°C и имеет тенденцию к завершению при температуре более 730°C. Поэтому температура самоограничения может быть немного ниже фактической температуры Кюри ферромагнитного проводника. Толщина скин-слоя для протекания тока в стали с содержанием 1% углерода составляет 0,132 см при комнатной температуре и увеличивается до 0,445 см при 720°C. В интервале от 720 до 730°C толщина скин-слоя резко увеличивается и достигает более чем 2,5 см. Поэтому нагреватель с ограничением температуры, в котором используется сталь с содержанием 1% углерода, начинает осуществлять самоограничение в интервале температур от 650 до 730°C.

Толщина скин-слоя обычно определяет эффективную глубину проникновения изменяющегося во времени тока в электропроводящий материал. В общем, плотность тока снижается по экспоненте в направлении от внешней поверхности к центру по радиусу проводника. Толщину, при которой плотность тока составляет приблизительно 1/e от плотности тока на поверхности, называют толщиной скин-слоя. Для сплошного цилиндрического стержня диаметром много больше вышеупомянутой глубины проникновения или для полых цилиндров с толщиной стенки, превышающей эту глубину проникновения, толщина скин-слоя δ определяется как

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

где δ - толщина скин-слоя в дюймах;

ρ - удельное электрическое сопротивление при рабочей температуре (Ом·см);

μ - относительная магнитная проницаемость и

f - частота (Гц).

Соотношение (1) взято из справочника "Handbook of Electrical Heating for Industry" by C. James Erickson (IEEE Press, 1995). Для большинства металлов удельное сопротивление (ρ) увеличивается с температурой. Относительная магнитная проницаемость обычно изменяется с температурой и величиной тока. Для оценки изменения магнитной проницаемости и/или толщины скин-слоя в зависимости от температуры и/или электрического тока могут быть использованы дополнительные соотношения. При этом зависимость μ от величины тока является следствием зависимости μ от магнитного поля.

Материалы, используемые в конструкции нагревателя с ограничением температуры, могут быть выбраны для обеспечения желательного показателя диапазона изменения. Для нагревателей с ограничением температуры могут быть выбраны величины показателя диапазона изменения, равные по меньшей мере 1,1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 10:1, 30:1 или 50:1. Может быть использована и большая крутизна характери-

стики. Выбранный показатель диапазона изменения может зависеть от ряда факторов, включая, но не с целью ограничения, тип пласта, в котором размещен нагреватель с ограничением температуры (например, более высокий показатель диапазона изменения может быть использован для пласта нефтяного сланца при больших различиях по теплопроводности между слоями нефтяного сланца, богатыми нефтью и обедненными), и/или температурный предел материалов, используемых в стволе скважины (например, температурные пределы материалов нагревателя). В некоторых вариантах осуществления показатель диапазона изменения увеличивается за счет присоединения к ферромагнитному материалу дополнительного материала - меди или другого хорошего электрического проводника (например, добавка меди для снижения сопротивления при температуре выше температуры Кюри).

Нагреватель с ограничением температуры может обеспечить минимальную тепловую мощность (выходную мощность) при температурах ниже температуры Кюри. В определенных вариантах осуществления минимальная тепловая мощность составляет по меньшей мере 400 Вт/м (ватт на метр длины), 600, 700, 800 Вт/м или выше, вплоть до 2000 Вт/м. Нагреватель с ограничением температуры снижает величину тепловой мощности с помощью участка нагревателя, когда температура этого участка приближается к температуре Кюри или превышает её. Эта уменьшенная величина тепловой мощности может быть, по существу, меньше тепловой мощности при температуре ниже температуры Кюри. В ряде вариантов осуществления уменьшенная величина тепловой мощности составляет не более 400, 200, 100 Вт/м или может достигать 0.

Сопротивление переменному току или сопротивление модулированному постоянному току и/или тепловая мощность нагревателя с ограничением температуры может уменьшиться при приближении температуры к температуре Кюри, причем уменьшиться резко при температурах, близких к температуре Кюри или выше нее, что происходит из-за эффекта Кюри. В некоторых вариантах величина электрического сопротивления или тепловой мощности при температурах, близких или превышающих температуру Кюри, составляет самое большее половину от величины электрического сопротивления или тепловой мощности в определенной точке ниже температуры Кюри. В некоторых вариантах осуществления величина тепловой мощности при температуре, превышающей или близкой к температуре Кюри, составляет самое большее 90, 70, 50, 30, 20, 10%, или меньше (до 1%) от тепловой мощности в определенной точке ниже температуры Кюри (например, на 30°C ниже температуры Кюри, на 40°C ниже температуры Кюри, на 50°C ниже температуры Кюри или на 100°C ниже температуры Кюри). В некоторых вариантах электрическое сопротивление при температуре, превышающей температуру Кюри или вблизи нее, уменьшается до 80, 70, 60, 50% или менее (до 1%) от электрического сопротивления в определенной точке ниже температуры Кюри (например, на 30°C ниже температуры Кюри, на 40°C ниже температуры Кюри, на 50°C ниже температуры Кюри или на 100°C ниже температуры Кюри).

В некоторых вариантах осуществления с целью изменения толщины скин-слоя ферромагнитного материала регулируют частоту переменного тока. Например, толщина скин-слоя стали с содержанием углерода 1% при комнатной температуре составляет 0,132 см при частоте 60 Гц, 0,0762 см при 180 Гц и 0,046 см при 440 Гц. Поскольку обычно диаметр нагревателя в два раза превышает толщину скин-слоя, применение более высокой частоты тока (и, следовательно, нагревателя меньшего диаметра) снижает стоимость нагревателя. Для заданной геометрии большая частота приводит к большему показателю диапазона изменения. Показатель диапазона изменения при большей частоте вычисляют путем умножения показателя диапазона изменения при меньшей частоте на корень квадратный из отношения большей частоты к меньшей частоте. В некоторых вариантах осуществления используют частоту от 100 до 1000 Гц, от 140 до 200 Гц или от 400 до 600 Гц (например, частоту 180, 540 или 720 Гц). В некоторых вариантах осуществления могут быть использованы высокие частоты. Эти частоты могут превышать 1000 Гц.

В определенных вариантах осуществления для электропитания нагревателя с ограничением температуры может быть использован модулированный DC (модулированный постоянный ток), например прерывистый DC, модулированный DC заданной формы или периодический DC. Для генерации выходного сигнала модулированного DC к источнику энергии DC могут быть присоединены DC-модулятор или DC-прерыватель. В некоторых вариантах осуществления источник энергии постоянного тока может включать в себя средство модулирования DC. Одним примером DC модулятора является преобразователь DC в DC. Преобразователи DC в DC в уровне техники, в общем, известны. DC обычно модулируют или прерывают с получением колебания желательной формы. Формы волны, используемые для осуществления модуляции DC, включают (не для ограничения изобретения) прямоугольную, синусоидальную, деформированную синусоидальную, деформированную прямоугольную, треугольную форму и другие правильные или неправильные формы.

Форма колебаний модулированного DC обычно определяет частоту модулированного DC. Поэтому для получения желательной частоты модулированного DC может быть выбрана определенная форма колебаний модулированного DC. Для изменения частоты модулированного DC можно менять форму и/или величину модуляции (например, величина прерывания) модулированного DC. DC может быть модулирован с частотами, которые выше обычно имеющихся частот AC. Например, модулированный DC может быть получен при частотах по меньшей мере 1000 Гц. Повышение частоты подводимого тока выгодно увеличивает показатель диапазона изменения нагревателя с ограничением температуры.

В определенных вариантах осуществления с целью изменения частоты модулированного DC регулируют или изменяют форму колебаний модулированного DC. Модулятор DC позволяет в любое время регулировать форму колебаний модулированного DC при использовании нагревателя с ограничением температуры и при больших токах или напряжениях. Таким образом, модулированный DC, подводимый к нагревателю с ограничением температуры, не ограничивается единственной частотой или даже небольшим рядом частот. Выбор формы колебания при использовании модулятора DC, как правило, обеспечивает широкий интервал частот модулированного DC и дискретное регулирование частоты модулированного DC. Поэтому частоту модулированного DC легче установить на конкретную величину, в то время как частота AC обычно ограничивается кратными величинами частоты электрической сети питания. Дискретное регулирование частоты модулированного DC обеспечивает более избирательное регулирование показателя диапазона изменения нагревателя с ограничением температуры. Возможность избирательного регулирования показателя диапазона изменения нагревателя с ограничением температуры обеспечивает более широкий выбор материалов, которые можно использовать при конструировании и изготовлении нагревателя с ограничением температуры.

В некоторых вариантах осуществления изобретения нагреватель с ограничением температуры включает составной проводник с ферромагнитной трубкой и неферромагнитным сердечником с высокой удельной электропроводностью. Неферромагнитный сердечник с высокой удельной электропроводностью уменьшает необходимый диаметр проводника. Сердцевина или неферромагнитный проводник может быть выполнен из меди или из медного сплава. Сердцевина или неферромагнитный проводник, кроме того, может быть выполнен из других металлов, которые обладают низким удельным электрическим сопротивлением и относительной магнитной проницаемостью, близкой к 1 (например, по существу из неферромагнитных материалов, таких как алюминий, сплавы алюминия, фосфористая бронза, бериллиево-медный сплав и/или латунь). Составной проводник позволяет вблизи температуры Кюри более резко понизить электрическое сопротивление нагревателя с ограничением температуры. Электрическое сопротивление проводника вблизи температуры, равной температуре Кюри, очень резко падает в связи с увеличением толщины скин-слоя за счет наличия медной сердцевины.

Составной проводник может увеличить электропроводность нагревателя с ограничением температуры и/или обеспечить функционирование нагревателя при более низких напряжениях. В одном варианте осуществления составной проводник демонстрирует относительно плоскую зависимость сопротивления от распределения температуры при температурах ниже области температур, находящейся вблизи температуры Кюри ферромагнитного проводника из составного проводника. В некоторых вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры демонстрирует относительно плоскую зависимость сопротивления от распределения температуры в интервале от 100 до 750°C или от 300 до 600°C. Относительно плоская зависимость сопротивления от распределения температуры, кроме того, может иметь место и в других интервалах температур, например, за счет определенного подбора материалов и/или расположения материалов в нагревателе с ограничением температуры. В определенных вариантах осуществления относительную толщину каждого материала в составном проводнике выбирают для получения желательного сопротивления нагревателя в зависимости от характера распределения температуры.

В определенных вариантах относительная толщина каждого материала составного проводника выбирается так, чтобы получить требуемую зависимость удельного сопротивления от распределения температуры для нагревателя с ограничением температуры.

Составной проводник (например, составной внутренний проводник или составной внешний проводник) может быть изготовлен с помощью методов, включающих (не в качестве ограничения) коэкструзию, накатывание, плотную посадку труб (например, путем охлаждения внутреннего элемента и нагревания внешнего элемента, затем ввода внутреннего элемента во внешний элемент, с последующим осуществлением операции протяжки и/или предоставления конструкции возможности охлаждаться), взрывное или электромагнитное плакирование, электродуговую наплавку, продольное приваривание полосы, плазменную порошковую сварку, коэкструзию заготовки, нанесение покрытия методом электроосаждения, протяжку, напыление, плазменное осаждение, литье с коэкструзией, электромагнитную формовку, литье из расплава (литье материала внутренней сердцевины внутри внешнего материала или наоборот), сборку, за которой следует сварка или высокотемпературная пайка твердым припоем, сварку с защитой от активного газа и/или ввод внутренней трубы во внешнюю трубу, после чего следует механическое расширение внутренней трубы посредством гидроформинга или использования приспособления для расширения и обжимки внутренней трубы в контакте с внешней трубой. В некоторых вариантах осуществления ферромагнитный проводник наматывают поверх неферромагнитного проводника. В определенных вариантах осуществления составные проводники формируют с использованием методов, подобных используемым для плакирования (например, плакирование медью стали). Металлургическое соединение между медным плакированием и основным ферромагнитным материалом может быть приемлемым. Составные проводники, полученные методом коэкструзии, которые образуют хорошее металлургическое соединение (например, хорошее соединение между медью и нержавеющей сталью марки 446), могут быть предоставлены компанией Anomet Products, Inc. (Shrewsbury, Massachusetts, U.S.A.).

На фиг. 3-9 представлены различные варианты осуществления нагревателей с ограничением температуры. Одно или большее количество особенностей варианта осуществления нагревателя с ограничением температуры, изображенного на любом из этих чертежей, может быть скомбинировано с одной или более чем одной особенностями выполнения других вариантов осуществления нагревателей, представленных на этих чертежах. В определенных раскрытых здесь вариантах осуществления нагреватели с ограничением температуры выполнены с такими геометрическими размерами, чтобы они работали при частоте переменного тока (АС) 60 Гц. Следует понимать, что эти размеры нагревателя с ограничением температуры могут быть скорректированы для того, чтобы нагреватель работал подобным же образом и при других частотах АС или при подводе модулированного ДС тока.

На фиг. 3 показан поперечный разрез варианта осуществления нагревателя типа проводник в трубе. В трубке 214 расположен проводник 212. Проводник 212 представляет собой стержень или трубку из электропроводящего материала. С обоих концов проводника 212 расположены участки 218 с низким сопротивлением, благодаря чему эти участки нагреваются меньше. Участок 218 с низким сопротивлением выполнен следующим образом: проводник 212 на этом участке имеет большее поперечное сечение или эти участки изготовлены из материала с более низким сопротивлением. В некоторых вариантах осуществления участок 218 с низким сопротивлением содержит проводник с низким сопротивлением, который соединен с проводником 212.

Труба 214 выполнена из электропроводящего материала. Труба 214 расположена в отверстии 216 в углеводородном слое 220. Диаметр отверстия 216 таков, что в отверстии 216 может помещаться труба 214.

Проводник 212 может быть отцентрирован в трубе 214 с помощью центраторов 222. Центраторы 222 электрически изолируют проводник 212 от трубы 214. Центраторы 222 препятствуют перемещению проводника 212 в трубе 214 и помогают должным образом располагать проводник 212 в трубе 214. Центраторы 222 выполнены из керамического материала или комбинации керамического материала и металла. Центраторы 222 препятствуют деформации проводника 212 в трубе 214. Центраторы 222 касаются друг друга или расположены вдоль проводника 212 на расстоянии, равном примерно от 0,1 м (метра) до примерно 3 м или более.

Второй участок 218 проводника 212 с низким сопротивлением может соединять проводник 212 с оборудованием 224 устья скважины, как показано на фиг. 3. Электрический ток может подаваться в проводник 212 по кабелю 226 электропитания через участок 218 проводника 212 с низким сопротивлением. Электрический ток проходит от проводника 212 через скользящее соединительное устройство 228 в трубку 214. Трубка 214 может быть электрически изолирована от корпуса 230 покрывающего слоя и от оборудования 224 устья скважины с тем, чтобы электрический ток возвращался в силовую кабель 226. Тепло может выделяться в проводнике 212 и трубе 214. Выделенное тепло может излучаться в трубе 214 и отверстии 216 для нагревания по меньшей мере части углеводородного слоя 220.

Корпус 230 покрывающего слоя может быть расположен в покрывающем слое 232. В некоторых вариантах осуществления изобретения корпус 230 покрывающего слоя окружен материалом (например, армирующим материалом и/или цементом), который предотвращает нагревание перекрывающего слоя 232. Участок 218 с низким сопротивлением проводника 212 может быть расположен в корпусе 230 покрывающего слоя. Участок 218 с низким сопротивлением проводника 212 изготовлен, например, из углеродистой стали. Участок 218 с низким сопротивлением проводника 212 может быть отцентрирован в корпусе 230 покрывающего слоя с использованием центраторов 222. Центраторы 222 расположены вдоль участка 218 с низким сопротивлением проводника 212 на расстоянии примерно от 6 до примерно 12 или, например, примерно 9 м. В варианте осуществления нагревателя участок 218 с низким сопротивлением проводника 212 соединен с проводником 212 одним или несколькими сварными швами. В других вариантах осуществления нагревателя участки с низким сопротивлением навинчены и приварены или как-то иначе соединены с проводником. Участок 218 с низким сопротивлением выделяет мало тепла или вообще не выделяет тепло в корпус 230 покрывающего слоя. Между корпусом 230 покрывающего слоя и отверстием 216 может быть расположено уплотнение 234. Уплотнение 234 может быть использовано в качестве крышки в месте соединения покрывающего слоя 232 и углеводородного слоя 220, чтобы иметь возможность заполнения материалами кольцевого пространства между корпусом 230 покрывающего слоя и отверстием 216. В некоторых вариантах осуществления уплотнение 234 препятствует протеканию флюида из отверстия 216 на поверхность 236.

На фиг. 4 показан поперечный разрез варианта осуществления извлекаемого источника тепла типа проводник в трубе. Труба 214 может быть так помещена в отверстие 216 через покрывающий слой 232, чтобы между трубой и корпусом 230 покрывающего слоя остался зазор. Флюиды могут извлекаться из отверстия 216 через зазор между трубой 214 и корпусом 230 покрывающего слоя. Флюиды могут извлекаться из зазора через трубу 238. Труба 214 и содержащиеся в трубе компоненты источника тепла, которые соединены с оборудованием 224 в устье скважины, могут быть извлечены из отверстия 216 в виде одного блока. Источник тепла может быть извлечен в виде одного блока для ремонта, замены и/или для использования в другой части пласта.

Для нагревателя с ограничением температуры, в котором при температуре ниже температуры Кюри

ферромагнитный проводник обеспечивает большую часть резистивной тепловой мощности, большая часть электрического тока протекает через материал с сильно нелинейными зависимостями магнитного поля (H) от магнитной индукции (B). Эти нелинейные функциональные зависимости могут вызвать значительные индуктивные эффекты и искажения, которые приводят к уменьшенному коэффициенту мощности в нагревателе с ограничением температуры при температурах ниже температуры Кюри. Эти эффекты могут затруднять управление подводом электрической энергии к нагревателю с ограничением температуры и могут привести к протеканию дополнительного электрического тока через поверхность и/или через проводники, подводящие энергию в покрывающий слой пласта. Следует отметить, что осуществление системы регулирования с использованием конденсатора переменной ёмкости или источников питания с модуляцией тока с тем, чтобы попытаться компенсировать эти эффекты, и регулирование нагревателей с ограничением температуры, в которых большая часть резистивной тепловой мощности выделяется при прохождении электрического тока через ферромагнитный материал, является дорогостоящим путем и затруднительно.

В определенных вариантах осуществления нагревателей с ограничением температуры ферромагнитный проводник ограничивает большую часть электрического тока, подводимого к электрическому проводнику, соединенному с ферромагнитным проводником, когда температура нагревателя ниже или близка к температуре Кюри ферромагнитного проводника. Электрическим проводником может быть покрытие, оболочка, опорный элемент, коррозионно-стойкий элемент или резистивный элемент. В некоторых вариантах осуществления ферромагнитный проводник ограничивает протекание большей части электрического тока электрическим проводником, размещенным между самым внешним слоем и ферромагнитным проводником. Ферромагнитный проводник размещен в сечении нагревателя с ограничением температуры так, что магнитные свойства ферромагнитного проводника при температуре Кюри или более низкой температуре ферромагнитного проводника ограничивают протекание большей части электрического тока электрическим проводником. Протекание большей части электрического тока ограничивается электрическим проводником благодаря скин-эффекту ферромагнитного проводника. Поэтому большая часть тока протекает через материал, по существу, с линейными резистивными свойствами в большей части рабочего диапазона нагревателя.

В определенных вариантах осуществления ферромагнитный материал и электрический проводник размещены в сечении нагревателя с ограничением температуры так, что скин-эффект ферромагнитного материала ограничивает глубину проникновения электрического тока в электрический проводник и ферромагнитный проводник при температурах ниже температуры Кюри ферромагнитного проводника. Таким образом, электрический проводник обеспечивает большую часть тепловой мощности нагревателя с ограничением температуры, определяемой электрическим сопротивлением, при температурах вплоть до температуры, соответствующей температуре Кюри ферромагнитного материала или близкой к ней. В определенных вариантах осуществления геометрические размеры электрического проводника могут быть выбраны такими, чтобы обеспечить желательные характеристики тепловой мощности.

Поскольку при температуре ниже температуры Кюри большая часть электрического тока протекает через электрический проводник, зависимость сопротивления нагревателя с ограничением температуры от распределения температуры, по меньшей мере, частично отражает зависимость сопротивления материала электрического проводника от распределения температуры. Следовательно, если материал электрического проводника имеет, по существу, линейную зависимость сопротивления от распределения температуры, зависимость сопротивления от распределения температуры нагревателя с ограничением температуры при температурах ниже температуры Кюри ферромагнитного материала является, по существу, линейной.

Электрическое сопротивление нагревателя с ограничением температуры незначительно зависит (или не зависит) от величины тока, протекающего через нагреватель, до тех пор, пока температура нагревателя близка к температуре Кюри. При температуре ниже температуры Кюри большая часть электрического тока протекает через электрический проводник, а не по ферромагнитному проводнику.

Зависимость сопротивления от распределения температуры в нагревателях с ограничением температуры, в которых большая часть тока протекает через электрический проводник, также имеет тенденцию к более резкому снижению сопротивления вблизи температуры Кюри ферромагнитного проводника или при этой температуре. Более резкое снижение сопротивления при температуре Кюри или вблизи неё легче контролировать, чем более постепенное снижение сопротивления вблизи температуры Кюри.

В определенных вариантах осуществления материал и/или размеры материала электрического проводника выбирают так, чтобы при температуре ниже температуры Кюри ферромагнитного материала нагреватель с ограничением температуры имел желательную зависимость сопротивления от распределения температуры.

Нагреватели с ограничением температуры, в которых большая часть электрического тока при температуре ниже температуры Кюри протекает в электрическом проводнике, а не в ферромагнитном проводнике, легче прогнозировать и/или контролировать. Характеристику нагревателей с ограничением температуры, в которых большая часть электрического тока при температуре ниже температуры Кюри протекает в электрическом проводнике, а не в ферромагнитном проводнике, легче прогнозировать, ис-

пользуя, например, зависимость их сопротивления от распределения температуры и/или зависимость коэффициента мощности от распределения температуры. Зависимость электрического сопротивления от распределений температуры и/или коэффициента мощности от распределения температуры можно оценить или предсказать, например, посредством экспериментальных измерений, которые позволяют рассчитать характеристику нагревателя с ограничением температуры; с помощью аналитических соотношений, которые позволяют оценить и предсказать характеристику нагревателя с ограничением температуры; и/или путем моделирования, которое также позволяет оценить или предсказать характеристику нагревателя с ограничением температуры.

В некоторых вариантах осуществления оцененное и предсказанное поведение нагревателя с ограничением температуры используется для управления нагревателем с ограничением температуры. Нагревателем с ограничением температуры можно управлять на основе измерений (оценок) сопротивления и/или коэффициента мощности при работе этого нагревателя. В некоторых вариантах осуществления мощность или ток, подаваемые в нагреватель с ограничением температуры, регулируются на основе оценок сопротивления и/или коэффициента мощности нагревателя при работе последнего и на основе сравнения этой оценки с предсказанным поведением нагревателя. В некоторых вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры управляется без измерения температуры нагревателя или температуры рядом с нагревателем. Управление нагревателем с ограничением температуры без проведения измерений температуры исключает эксплуатационные затраты, связанные с измерением внутрискважинной температуры. Управление нагревателем с ограничением температуры на основе оценки сопротивления и/или коэффициента мощности нагревателя также снижает время проведения регулировки мощности или тока, подаваемых в нагреватель, по сравнению с управлением нагревателя на основе измеренной температуры.

С приближением температуры нагревателя с ограничением температуры к температуре Кюри ферромагнитного проводника или более высокой температуре ухудшение ферромагнитных свойств ферромагнитного проводника приводит к протеканию электрического тока через большую часть электропроводящего сечения нагревателя с ограничением температуры. В результате электрическое сопротивление нагревателя с ограничением температуры снижается и в результате при температуре Кюри ферромагнитного материала или вблизи неё нагреватель с ограничением температуры автоматически обеспечивает уменьшенную тепловую мощность. В определенных вариантах осуществления для уменьшения электрического сопротивления нагревателя при температуре, равной или превышающей температуру Кюри ферромагнитного проводника, к ферромагнитному проводнику и электрическому проводнику присоединен элемент с высокой электрической проводимостью. Элемент с высокой электрической проводимостью может быть внутренним проводником, сердцевинной или другим токопроводящим элементом, выполненным из меди, алюминия, никеля или их сплавов.

Ферромагнитный проводник, который ограничивает большую часть электрического тока, подводимого к электрическому проводнику при температуре ниже температуры Кюри, может иметь относительно небольшое поперечное сечение по сравнению с ферромагнитным проводником в нагревателях с ограничением температуры, которые используют этот ферромагнитный проводник для обеспечения большей части резистивной тепловой мощности при температуре, равной температуре Кюри или близкой к ней. Нагреватель с ограничением температуры, который для обеспечения большей части резистивной тепловой мощности при температурах ниже температуры Кюри использует электрический проводник, обладает при этих температурах низкой магнитной индуктивностью, поскольку через ферромагнитный проводник протекает меньший ток по сравнению с таким же нагревателем с ограничением температуры, в котором большая часть резистивной тепловой мощности при температурах ниже температуры Кюри обеспечивается ферромагнитным материалом. Магнитное поле (H) ферромагнитного проводника радиусом (r) пропорционально току (I), протекающему через ферромагнитный проводник и сердцевину, разделенному на величину радиуса, т.е.

$$(2) \quad H \sim I/r$$

В связи с тем, что через ферромагнитный проводник нагревателя с ограничением температуры, в котором для обеспечения большей части резистивной тепловой мощности при температурах ниже температуры Кюри используют внешний проводник, протекает только часть тока, магнитное поле нагревателя с ограничением температуры может быть значительно меньше, чем магнитное поле нагревателя с ограничением температуры, в котором большая часть электрического тока протекает через ферромагнитный материал. Относительная магнитная проницаемость (μ) при небольших магнитных полях может быть значительной.

Толщина скин-слоя (δ) ферромагнитного проводника обратно пропорциональна корню квадратному из относительной магнитной проницаемости (μ):

$$(3) \quad \delta \sim (1/\mu)^{1/2}$$

Увеличение относительной магнитной проницаемости уменьшает толщину скин-слоя ферромагнитного проводника. Однако поскольку при температурах ниже температуры Кюри через ферромагнитный проводник протекает только часть тока, то для ферромагнитных материалов с высокой относитель-

ной магнитной проницаемостью с целью компенсации уменьшенной толщины скин-слоя радиус (или толщина) ферромагнитного проводника может быть уменьшен, причем уменьшен таким образом, чтобы при температурах ниже температуры Кюри ферромагнитного проводника скин-эффект все же ограничивал глубину проникновения электрического тока в электрический проводник. Радиус (толщина) ферромагнитного проводника может составлять от 0,3 до 8 мм, от 0,3 до 2 мм или от 2 до 4 мм в зависимости от величины относительной магнитной проницаемости ферромагнитного проводника. Уменьшение толщины ферромагнитного проводника снижает стоимость изготовления нагревателя с ограничением температуры, так как стоимость ферромагнитного материала вносит значительный вклад в общую стоимость нагревателя с ограничением температуры. Увеличение относительной магнитной проницаемости ферромагнитного проводника обеспечивает больший показатель диапазона изменения и более резкое снижение электрического сопротивления нагревателя с ограничением температуры при достижении температуры Кюри ферромагнитного материала или вблизи этой температуры.

Ферромагнитные материалы (такие как чистое железо или сплавы железа с кобальтом) с высокой относительной магнитной проницаемостью (например, по меньшей мере 200, по меньшей мере 1000, по меньшей мере $1 \cdot 10^4$ или по меньшей мере $1 \cdot 10^5$) и/или высокой температурой Кюри (составляющей, например, по меньшей мере 600°C, по меньшей мере 700°C или по меньшей мере 800°C) имеют тенденцию к меньшей коррозионной стойкости и/или меньшей механической прочности при высоких температурах нагревателя с ограничением температуры. Поэтому ферромагнитный проводник может быть выбран, главным образом, исходя из его ферромагнитных свойств.

Ограничение протекания большей части электрического тока по электрическому проводнику при температуре ниже температуры Кюри ферромагнитного проводника уменьшает изменения коэффициента мощности. Поскольку при температуре ниже температуры Кюри через ферромагнитный проводник протекает только часть электрического тока, нелинейные ферромагнитные свойства ферромагнитного проводника оказывают незначительное влияние (или вообще не оказывают) на величину коэффициента мощности нагревателя с ограничением температуры, за исключением температур, равных или близких к температуре Кюри. Даже при температурах, равных или близких к температуре Кюри, влияние на коэффициент мощности снижается по сравнению с такими нагревателями с ограничением температуры, в которых ферромагнитный проводник обеспечивает большую часть резистивной тепловой мощности при температуре ниже температуры Кюри. Поэтому для поддержания относительно высокой величины коэффициента мощности существует лишь незначительная потребность во внешней компенсации или же она вообще отсутствует (например, с помощью переменных конденсаторов или изменения формы колебаний) с целью изменения индуктивной нагрузки нагревателя с ограничением температуры.

В определенных вариантах осуществления нагреватель с ограничением температуры, который ограничивает большую часть протекающего электрического тока электрическим проводником при температуре ниже температуры Кюри ферромагнитного проводника, поддерживает при его использовании величину коэффициента мощности равной 0,85, более 0,9 или более 0,95. Любое уменьшение коэффициента мощности происходит только на тех участках нагревателя с ограничением температуры, температура которых близка к температуре Кюри. Эти участки характеризуются высокой величиной коэффициента мощности, которая приближается к 1. При этом если некоторые участки нагревателя имеют величину коэффициента мощности менее 0,85, то коэффициент мощности всего нагревателя с ограничением температуры при его функционировании поддерживается на уровне выше 0,85, выше 0,9 или выше 0,95.

Поддержание высокого коэффициента мощности, кроме того, позволяет использовать менее дорогостоящие источники энергии и/или управляющие устройства, такие как полупроводниковые источники питания или кремниевые управляемые вентили. Эти устройства не работают соответствующим образом в том случае, если величина коэффициента мощности меняется слишком сильно из-за индуктивных нагрузок. Однако если коэффициент нагрузки поддерживать при больших значениях, то эти устройства можно использовать для подвода питания к нагревателю с ограничением температуры. Полупроводниковые источники энергии, кроме того, имеют преимущества в том, что обеспечивают точную настройку и управляемую подстройку мощности, подводимой к нагревателю с ограничением температуры.

В некоторых вариантах осуществления для подвода электрической энергии к нагревателю с ограничением температуры используют трансформаторы. Обмотка трансформатора может быть снабжена ответвлениями с различными напряжениями подвода электрического питания к нагревателю с ограничением температуры. Эти ответвления с различными напряжениями позволяют подводить электрический ток с переключением "вперед" и "назад" между различными напряжениями питания. Это поддерживает ток в интервале, определяемом указанными ответвлениями с различным напряжением питания.

Элемент с высокой электропроводностью, или внутренний проводник, увеличивает показатель диапазона изменения для нагревателя с ограничением температуры. В определенных вариантах осуществления для увеличения показателя диапазона изменения для нагревателя с ограничением температуры увеличивают толщину элемента с высокой электропроводностью, а в некоторых вариантах осуществления для увеличения показателя диапазона изменения для нагревателя толщину элемента с высокой электропроводностью уменьшают. В определенных вариантах осуществления показатель диапазона изменения для нагревателя с ограничением температуры составляет от 1,1 до 10, от 2 до 8 или от 3 до 6 (например,

показатель диапазона изменения составляет по меньшей мере 1,1, по меньшей мере 2 или по меньшей мере 3).

На фиг. 15 представлен вариант осуществления нагревателя с ограничением температуры, в котором при температуре ниже температуры Кюри ферромагнитного проводника большую часть тепловой мощности обеспечивает опорный элемент. Сердцевина 240 является внутренним проводником нагревателя с ограничением температуры. В определенных вариантах осуществления сердцевина 240 выполнена из материала с высокой электропроводностью, например из меди или алюминия. В некоторых вариантах осуществления сердцевина 240 выполнена из медного сплава, который создает механическую прочность и хорошую электропроводность, например из дисперсионно-упрочненной меди. В одном варианте осуществления и сердцевина 240 выполнена из материала Glidcop® (SCM Metal Products, Inc., Research Triangle Park, North Carolina, U.S.A.). Ферромагнитный проводник 242 представляет собой тонкий слой ферромагнитного материала, размещенный между электрическим проводником 244 и сердцевиной 240. В определенных вариантах осуществления электрический проводник 244, кроме того, является опорным элементом 242. В определенных вариантах осуществления ферромагнитный проводник 242 выполнен из железа или сплава железа. В некоторых вариантах осуществления ферромагнитный проводник 242 включает в себя ферромагнитный материал с высокой относительной магнитной проницаемостью. Например, ферромагнитный проводник 242 может быть изготовлен из очищенного железа, например из технически чистого армко-железа (AK Steel Ltd., United Kingdom). Железо с некоторым количеством примесей, как правило, имеет относительную магнитную проницаемость порядка 400. Очистка железа посредством его отжига в атмосфере газообразного водорода (H_2) при $1450^\circ C$ повышает относительную магнитную проницаемость железа. Увеличение относительной магнитной проницаемости ферромагнитного проводника 242 позволяет уменьшить толщину ферромагнитного проводника. Например, толщина неочищенного железа может составлять приблизительно 4,5 мм, в то время как толщина очищенного железа составляет примерно 0,76 мм.

В определенных вариантах осуществления электрический проводник 244 обеспечивает укрепление ферромагнитного проводника 242 и всего нагревателя с ограничением температуры. Соответственно, электрический проводник 244 может быть изготовлен из материала, который обеспечивает хорошую механическую прочность при температуре, близкой к температуре Кюри ферромагнитного материала или превышающей эту температуру. В определенных вариантах осуществления электрический проводник 244 выполнен коррозионно-стойким. Электрический проводник 244 (опорный элемент 248) изготовлен из материала, который обеспечивает желательную электрическую резистивную тепловую мощность при температурах вплоть до и/или выше температуры Кюри ферромагнитного проводника 242.

В одном варианте осуществления электрический проводник 244 изготовлен из нержавеющей стали марки 347H. В некоторых вариантах осуществления электрический проводник 244 выполнен из другого электропроводного, коррозионно-стойкого материала, имеющего хорошую механическую прочность. Например, материалами для электрического проводника 242 могут быть нержавеющая сталь 304H, 316H, 347HH, NF709, сплав 800H Inloy® (Inco Allow International, Huntington West Virginia, U.S.A.), сплав HR120® Haynes® или сплав 617 Inconel®.

В некоторых вариантах осуществления электрический проводник 244 (опорный элемент 248) на различных участках нагревателя с ограничением температуры включает в себя различные сплавы. Например, нижний участок электрического проводника 244 (несущего элемента 248) выполнен из нержавеющей стали 347H, а материалом для верхнего участка электрического проводника (несущего элемента) служит NF709. В определенных вариантах осуществления на различных участках электрического проводника (несущего элемента) используют различные сплавы для увеличения механической прочности электрического проводника (несущего элемента) и сохранения в то же время желательных тепловых свойств нагревателя с ограничением температуры.

В некоторых вариантах осуществления ферромагнитный проводник 242 на различных участках нагревателя с ограничением температуры включает в себя различные ферромагнитные проводники. Различные ферромагнитные проводники могут быть использованы на различных участках нагревателя с целью изменения температуры Кюри и тем самым максимальной рабочей температуры на различных участках нагревателя. В некоторых вариантах осуществления температура Кюри для верхнего участка нагревателя с ограничением температуры ниже температуры Кюри нижнего участка нагревателя. Более низкая температура Кюри верхнего участка способствует увеличению периода времени до разрушения материала верхнего участка нагревателя при испытании на длительную прочность.

В варианте осуществления, представленном на фиг. 5, ферромагнитный проводник 242, электрический проводник 244 и сердцевина 240 имеют такие размеры, что толщина скин-слоя ферромагнитного проводника ограничивает глубину проникновения большей части потока электрического тока опорным элементом при температуре ниже температуры Кюри ферромагнитного проводника. Следовательно, электрический проводник 244 обеспечивает большую часть резистивной тепловой мощности нагревателя с ограничением температуры при температурах вплоть до температуры Кюри ферромагнитного проводника 242 или близких к ней. В определенных вариантах осуществления нагреватель с ограничением тем-

пературы, показанный на фиг. 5 (имеющий, например, внешний диаметр 3, 2,9, 2,5 см или менее), выполнен с меньшим диаметром по сравнению с другими нагревателями с ограничением температуры, которые для получения большей части резистивной тепловой мощности не используют электрический проводник 244. Нагреватель с ограничением температуры, представленный на фиг. 5, может быть выполнен с меньшим диаметром, поскольку ферромагнитный проводник 242 имеет меньшую толщину по сравнению с ферромагнитным проводником, необходимым для такого нагревателя с ограничением температуры, в котором большая часть резистивной тепловой мощности обеспечивается ферромагнитным проводником.

В некоторых вариантах осуществления опорный элемент и коррозионно-стойкий элемент представляют собой различные элементы в конструкции нагревателя с ограничением температуры. На фиг. 6 и 7 представлены варианты осуществления нагревателей с ограничением температуры, в которых выделение большей части тепловой мощности при температуре ниже температуры Кюри ферромагнитного материала обеспечивает оболочка. В этих вариантах осуществления электрический проводник 244 является оболочкой 246. Электрический проводник 244, ферромагнитный проводник 242, опорный элемент 248 и сердцевина 240 (на фиг. 6) или внутренний проводник 252 (на фиг. 7) имеют такие геометрические размеры, что скин-слой ферромагнитного проводника ограничивает проникновение большей части электрического тока толщиной оболочки. В определенных вариантах осуществления электрический проводник 244 выполнен из коррозионно-стойкого материала и обеспечивает резистивную тепловую мощность при температурах ниже температуры Кюри ферромагнитного проводника 242. Например, электрический проводник 244 может быть изготовлен из нержавеющей стали 347Н или нержавеющей стали 825. В некоторых вариантах осуществления электрический проводник 244 имеет небольшую толщину (например, порядка 0,5 мм).

В представленном на фиг. 6 варианте осуществления сердцевина 240 выполнена из материала с высокой электропроводностью, например из меди или алюминия. Опорный элемент 248 изготовлен из нержавеющей стали 347Н или из другого материала, обладающего хорошей механической прочностью при температуре, равной или близкой к температуре Кюри ферромагнитного проводника 242.

В соответствии с вариантом осуществления, проиллюстрированным на фиг. 7, опорный элемент 248 представляет собой сердцевину нагревателя с ограничением температуры и выполнен из нержавеющей стали 347Н или другого материала с хорошей механической прочностью при температуре, равной или близкой к температуре Кюри ферромагнитного проводника 242. Внутренний проводник 252 изготовлен из материала с высокой электропроводностью, такого как медь или алюминий.

На фиг. 8А и 8В показаны поперечные разрезы одного варианта осуществления нагревателя с ограничением температуры с тремя соосными проводниками, при этом средний проводник 250 содержит электрический проводник в дополнение к ферромагнитному материалу. Электрический проводник может быть расположен снаружи среднего проводника 250. Размеры электрического проводника и ферромагнитного материала выбраны таким образом, что глубина скин-слоя ферромагнитного материала ограничивает глубину проникновения большей части электрического тока электрическим проводником в случае, когда температура меньше температуры Кюри ферромагнитного материала. Электрический проводник обеспечивает большую часть резистивной тепловой мощности среднего проводника 250 (и нагревателя с ограничением температуры и тремя соосными проводниками) при температурах, доходящих до температуры Кюри ферромагнитного проводника или близких к ней. Электрический проводник выполнен из материала, который обеспечивает требуемую резистивную тепловую мощность при температурах, доходящих до температуры Кюри ферромагнитного элемента и/или превышающих ее. Например, электрический проводник выполнен из нержавеющей стали 347Н, из нержавеющей стали 304Н, 316Н, 347НН, NF709, сплава Incoloy® 800Н, сплава Haynes® HR120® или сплава Inconel® 617.

В некоторых вариантах осуществления материалы и конструкция нагревателя с ограничением температуры выбраны таким образом, чтобы имелась возможность использовать нагреватель при высоких температурах (например, выше 850°C). На фиг. 9 показан высокотемпературный вариант осуществления нагревателя с ограничением температуры. Нагреватель на фиг. 9 работает как нагреватель типа проводник в трубе, причем большая часть теплоты вырабатывается в трубе 214. Нагреватель типа проводник в трубе может обеспечивать более высокую тепловую мощность, так как большая часть теплоты вырабатывается в трубе 214, а не в проводнике 212. При выработке тепла в трубе 214 уменьшаются потери теплоты, связанные с переносом тепла между трубкой и проводником 212.

Сердечник 240 и проводящий слой 254 выполнены из меди. В некоторых вариантах осуществления изобретения сердечник 240 и проводящий слой 254 выполнены из никеля, если рабочие температуры должны быть равны температуре плавления меди или превышать ее. Опорные элементы 248 выполнены из токопроводящих материалов с хорошей механической прочностью при высоких температурах. Материалы для опорных элементов 248, которые выдерживают, по меньшей мере, максимальную температуру в 870°C, могут быть, помимо прочего, сплавами MO-RE® (компания Duraloy Technologies, Inc. (Scottsdale, Пенсильвания, США)), CF8C+ (компания Metaltel Intl. (Waukesha, Висконсин, США)) или сплавом Inconel® 617. Материалы для опорных элементов 248, которые выдерживают, по меньшей мере, максим-

мальную температуру в 980°C, могут быть, помимо прочего, сплавом Incoloy® Alloy MA 956. Опорный элемент 248 в трубе 214 обеспечивает механическую опору для трубы. Опорный элемент 248 в проводнике 212 обеспечивает механическую опору для сердечника 240.

Электрический проводник 244 выполнен из тонкого коррозионно-стойкого материала. В некоторых вариантах осуществления изобретения электрический проводник 244 выполнен из нержавеющей стали 347Н, 617, 625 или 800Н. Ферромагнитный проводник 242 выполнен из ферромагнитного материала с высокой температурой Кюри, такого как сплав железа и кобальта (например, сплава железа и кобальта с 15 вес.% кобальта).

В некоторых вариантах осуществления изобретения электрический проводник 244 обеспечивает большую часть тепловой мощности нагревателя с ограничением температуры при температурах, равных или близких к температуре Кюри ферромагнитного проводника 242. Проводящий слой 254 увеличивает показатель диапазона изменения нагревателя с ограничением температуры.

В некоторых вариантах осуществления изобретения нагреватель с ограничением температуры используется для достижения меньшей температуры нагревания (например, для нагревания флюидов в эксплуатационной скважине, для нагревания наземного трубопровода или для снижения вязкости флюидов в скважинах или в области рядом со скважиной). Смена ферромагнитных материалов нагревателя с ограничением температуры позволяет добиваться меньшей температуры нагревания. В некоторых вариантах осуществления изобретения ферромагнитный проводник изготовлен из материала с температурой Кюри, меньшей температуры Кюри нержавеющей стали 446. Например, ферромагнитный проводник может быть выполнен из сплава железа и никеля. Содержание никеля в этом сплаве может составлять от 30 до 42 вес.%, а остальная часть сплава - это железо. В одном варианте осуществления изобретения сплав представляет собой сплав Invar 36. Invar 36 содержит 36 вес.% никеля в железе и температура Кюри этого сплава равна 277°C. В некоторых вариантах осуществления изобретения сплав представляет собой трехкомпонентный сплав, например, из хрома, никеля и железа. Например, сплав может содержать 6 вес.% хрома, 42 вес.% никеля и 52 вес.% железа. Показатель диапазона изменения стержня из сплава Invar 36, диаметром 2,5 см составляет примерно 2 к 1 при температуре, равной температуре Кюри. Расположение сплава Invar 36 поверх медного сердечника позволяет уменьшить диаметр стержня. Использование медного сердечника приводит к большим показателям диапазона изменения. Изолятор в вариантах осуществления низкотемпературного нагревателя может быть выполнен из высокоэффективного полимерного изолятора (такого как перфторалкокси или РЕЕК™) в случае использования со сплавами, температура Кюри которых ниже температуры плавления или температуры размягчения полимерного изолятора.

Примеры

Ниже изложены примеры, не ограничивающие изобретение.

Нагреватель с ограничением температуры, длиной 1,83 м, расположен в корпусе из нержавеющей стали 347Н, длиной 1,83 м. Нагревательный элемент соединен с корпусом последовательно. Нагревательный элемент и корпус помещены в печь. Печь использована для повышения температуры нагревательного элемента и корпуса. При разных температурах через нагревательный элемент и корпус пропусклся электрический ток при различных значениях тока. При прохождении электрического тока измерялись сопротивление нагревательного элемента и коэффициент мощности.

На фиг. 10 показаны экспериментально полученные зависимости электрического сопротивления (мОм) от температуры (°C) при нескольких значениях тока для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из углеродистой стали и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н. Ферромагнитный проводник выполнен из низкоуглеродистой стали с температурой Кюри 770°C. Ферромагнитный проводник расположен между медным сердечником и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н. Диаметр медного сердечника равен 1,27 см. Внешний диаметр ферромагнитного проводника равен 1,94 см. Внешний диаметр опорного элемента равен 2,67 см. Корпус представляет собой корпус из трубки Schedule 160, размером 7,62 см, и выполнен из нержавеющей стали 347Н.

Данные, помеченные позицией 256, показывают зависимость электрического сопротивления от температуры для переменного тока 300 А с частотой 60 Гц. Данные, помеченные позицией 258, показывают зависимость электрического сопротивления от температуры для переменного тока 400 А с частотой 60 Гц. Данные, помеченные позицией 260, показывают зависимость электрического сопротивления от температуры для переменного тока 500 А с частотой 60 Гц. Кривая 262 показывает зависимость сопротивления от температуры для постоянного тока 10 А. Данные по зависимости сопротивления от температуры показывают, что сопротивление переменному току нагревателя с ограничением температуры линейно увеличивается до тех пор, пока температура не станет близкой к температуре Кюри ферромагнитного проводника. При температурах, близких к температуре Кюри, сопротивление переменному току быстро уменьшается до тех пор, пока сопротивление переменному току не сравняется с сопротивлением постоянному току при температурах, превосходящих температуру Кюри. Линейная зависимость сопротивления переменному току при температурах, меньших температуры Кюри, по меньшей мере, частично

отражает линейную зависимость сопротивления переменному току нержавеющей стали 347Н при указанных температурах. Таким образом, линейная зависимость сопротивления переменному току при температурах, меньших температуры Кюри, показывает, что при таких температурах большая часть электрического тока протекает по опорному элементу из нержавеющей стали 347Н.

На фиг. 11 показаны экспериментально полученные данные зависимости электрического сопротивления (мОм) от температуры ($^{\circ}\text{C}$) при нескольких значениях тока для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из сплава железа и кобальта и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н. Ферромагнитный проводник выполнен из сплава железа и кобальта, в котором кобальт составляет 6 вес.%, а температура Кюри равна 834°C . Ферромагнитный проводник расположен между медным сердечником и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н. Диаметр медного сердечника равен 1,18 см. Внешний диаметр ферромагнитного проводника равен 1,94 см. Внешний диаметр опорного элемента равен 2,67 см. Корпус представляет собой корпус из трубки Schedule 160 размером 7,62 см и выполнен из нержавеющей стали 347Н.

Данные, обозначенные позицией 264, показывают зависимость электрического сопротивления от температуры для переменного тока 100 А с частотой 60 Гц. Данные, обозначенные позицией 266, показывают зависимость электрического сопротивления от температуры для переменного тока 400 А с частотой 60 Гц. Кривая 268 показывает зависимость сопротивления от температуры для постоянного тока 10 А. Сопротивление переменному току указанного нагревателя с ограничением температуры уменьшается при более высокой температуре по сравнению с предыдущим нагревателем с ограничением температуры. Это происходит из-за добавления кобальта, увеличивающего температуру Кюри ферромагнитного проводника. Сопротивление переменному току практически совпадает с сопротивлением переменному току трубки из стали 347Н, размеры которой совпадают с размерами опорного элемента. Это показывает, что при указанных температурах большая часть электрического тока протекает по опорному элементу из нержавеющей стали 347Н. Форма кривых зависимости сопротивления от времени на фиг. 11 практически аналогична форме кривых зависимости сопротивления от времени на фиг. 10.

На фиг. 12 показаны экспериментально полученные данные зависимости коэффициента мощности (ось у) от температуры ($^{\circ}\text{C}$) при двух значениях переменного тока для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из сплава железа и кобальта и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н. Кривая 270 изображает зависимость коэффициента мощности от температуры для переменного тока 100 А с частотой 60 Гц. Кривая 272 изображает зависимость коэффициента мощности от температуры для переменного тока 400 А с частотой 60 Гц. Коэффициент мощности близок к единице (1) за исключением области, когда температура близка к температуре Кюри. В области температур, близких к температуре Кюри, нелинейные магнитные свойства и протекание большей части электрического тока через ферромагнитный проводник порождают индуктивные эффекты и деформацию нагревателя, что уменьшает коэффициент мощности. На фиг. 12 показано, что во время эксперимента минимальное значение коэффициента мощности для указанного нагревателя оставалось больше 0,85 при всех температурах. Так как в любой конкретный момент времени достигнуть температуры Кюри могут только некоторые участки нагревателя с ограничением температуры, который используется для нагревания пласта, а коэффициент мощности этих участков не опускается при использовании ниже 0,85, то коэффициент мощности всего нагревателя с ограничением температуры будет оставаться больше 0,85 (например, больше 0,9 или больше 0,95).

По данным экспериментов для нагревателя с ограничением температуры с медным сердечником, ферромагнитным проводником из сплава железа и кобальта и опорным элементом из нержавеющей стали 347Н был вычислен показатель диапазона изменения (ось у) в зависимости от максимальной мощности (Вт/м), подаваемой в нагреватель с ограничением температуры. Результаты указанных вычислений представлены на фиг. 13. Кривая на фиг. 13 показывает, что показатель диапазона изменения (ось у) остается больше 2, если подаваемая в нагреватель мощность больше приблизительно 2000 Вт/м. Указанная кривая используется для определения возможности нагревателя эффективно обеспечивать тепловую мощность в устойчивом режиме. Нагреватель с ограничением температуры, для которого кривая аналогична кривой на фиг. 13, способен обеспечивать значительную тепловую мощность при одновременном поддержании свойств ограничения температуры, которые препятствуют перегреву или неисправной работе нагревателя.

Для прогнозирования экспериментальных результатов была использована теоретическая модель. Теоретическая модель основана на аналитической формуле для сопротивления переменному току составного проводника. Составной проводник содержит тонкий слой ферромагнитного материала с относительной магнитной проницаемостью $\mu_2/\mu_0 \gg 1$, который расположен между двумя неферромагнитными материалами, относительные магнитные проницаемости которых μ_1/μ_0 и μ_3/μ_0 близки к единице и в которых скин-эффекты пренебрежимо малы. В указанной модели предполагается, что ферромагнитный материал ведет себя линейно. Кроме того, метод, в соответствии с которым из магнитных данных получена относительная магнитная проницаемость μ_2/μ_0 для использования в модели, далек от точного.

В теоретической модели радиусы трех проводников, от расположенного в самой глубине до распо-

ложенного на поверхности, равны, соответственно, $a < b < c$, а их электрические сопротивления равны σ_1 , σ_2 и σ_3 . Электрическое и магнитное поля везде имеют синусоидальную форму:

электрические поля

$$(7) E_1(r, t) = E_{S1}(r) e^{j\omega t}, r < a;$$

$$(8) E_2(r, t) = E_{S2}(r) e^{j\omega t}, a < r < b; \text{ и}$$

$$(9) E_3(r, t) = E_{S3}(r) e^{j\omega t}, b < r < c.$$

магнитные поля

$$(10) H_1(r, t) = H_{S1}(r) e^{j\omega t}, r < a;$$

$$(11) H_2(r, t) = H_{S2}(r) e^{j\omega t}, a < r < b; \text{ и}$$

$$(12) H_3(r, t) = H_{S3}(r) e^{j\omega t}, b < r < c.$$

Граничные условия на поверхностях раздела таковы

$$(13) E_{S1}(a) = E_{S2}(a); H_{S1}(a) = H_{S2}(a); \text{ и}$$

$$(14) E_{S2}(b) = E_{S3}(b); H_{S2}(b) = H_{S3}(b).$$

Электрические токи равномерно распределены в проводниках "не Кюри", так что

$$(15) H_{S1}(a) = J_{S1}(a) (a/2) = \frac{1}{2} a \sigma_1 E_{S1}(a); \text{ и}$$

$$(16) I - 2 \pi b H_{S3}(b) = \pi (c^2 - b^2) J_{S3}(b) = \pi (c^2 - b^2) \sigma_3 E_{S3}(b).$$

Здесь I обозначает общий ток, протекающий через составной проводник. Формулы (13) и (14) используются для выражения формул (15) и (16) в терминах граничных условий, относящихся к материалу 2 (ферромагнитный материал). Это влечет следующее:

$$(17) H_{S2}(a) = \frac{1}{2} a \sigma_1 E_{S2}(a); \text{ и}$$

$$(18) I = 2 \pi b H_{S2}(b) + \pi (c^2 - b^2) \sigma_3 E_{S2}(b).$$

$E_{S2}(r)$ удовлетворяет равенству

$$(19) \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dE_{S2}}{dr} \right) - C^2 E_{S2} = 0,$$

где

$$(20) C^2 = j \omega \mu_2 \sigma_2.$$

Используя

$$(21) H_{S2}(r) = \frac{j}{\mu_2 \omega} \frac{dE_{S2}}{dr};$$

получают граничные условия в формулах (17) и (18), выраженные в терминах E_{S2} , и их производные

$$(22) \left. \frac{j}{\mu_2 \omega} \frac{dE_{S2}}{dr} \right|_a = \frac{1}{2} a \sigma_1 E_{S2}(a); \text{ и}$$

$$(23) I = 2 \pi b \left. \frac{j}{\mu_2 \omega} \frac{dE_{S2}}{dr} \right|_b + \pi (c^2 - b^2) \sigma_3 E_{S2}(b).$$

Безразмерная величина χ вводится с помощью следующего равенства:

$$(24) r = \frac{1}{2} (a + b) \left\{ 1 + \frac{b - a}{a + b} \chi \right\}.$$

Величина χ равна -1 при $r = a$ и χ равна 1 при $r = b$. С использованием χ формула (19) записывается следующим образом:

$$(25) (1 + \beta \chi)^{-1} \frac{d}{d\chi} \left\{ (1 + \beta \chi) \frac{dE_{S2}}{d\chi} \right\} - \alpha^2 \chi = 0,$$

где

$$(26) \alpha = \frac{1}{2} (b - a) C; \text{ и}$$

$$(27) \beta = (b - a) / (b + a).$$

α может быть выражено следующим образом:

$$(28) \alpha = \alpha_R (1 - i),$$

где

$$(29) \alpha_R^2 = 1/8 (b - a)^2 \mu_2 \sigma_2 \omega = 1/4 (b - a)^2 / \delta^2.$$

Формулы (22) и (23) перепишем следующим образом:

$$(30) \left. \frac{d}{d\chi} \right|_{-1} E_a = -j \gamma_a E_a; \text{ и}$$

$$(31) \left. \frac{d}{d\chi} \right|_1 E_b = j \gamma_b E_b - j \tilde{I}.$$

В формулах (30) и (31) вместо $E_{S2}(a)$ и $E_{S2}(b)$ использованы краткие обозначения E_a и E_b соответственно и введены безразмерные параметры γ_a и γ_b и нормализованный ток $\tilde{I}$. Указанные параметры равны соответственно

$$(32) \gamma_a = 1/4 (b - a) \omega \mu_2 \sigma_1; \gamma_b = 1/2 (c^2 - b^2) (b - a) \omega \mu_2 \sigma_3 / b; \text{ и}$$

$$(33) \tilde{I} = 1/2 (b - a) \omega \mu_2 I / (2 \pi b).$$

Используя безразмерные параметры из формулы (29), формула (32) переписывается следующим образом:

$$(34) \gamma_a = 2 (\sigma_1 / \sigma_2) a \alpha_R^2 / (b - a); \quad \gamma_b = 4 (\sigma_3 / \sigma_2) (c^2 - b^2) \alpha_R^2 / \{ b (b - a) \}.$$

Так же формулу (34) можно записать следующим образом:

$$(35) \gamma_a = (\sigma_1 / \sigma_2) a \alpha_R^2 / \delta; \quad \gamma_b = 2 (\sigma_3 / \sigma_2) (c^2 - b^2) \alpha_R / (\delta b).$$

Средняя мощность на единицу длины, выделяемая в материале, равна:

$$(36) P = 1/2 \left\{ \sigma_1 \pi a^2 |E_a|^2 + 2 \pi \sigma_2 \int_a^b dr r |E_{S2}(r)|^2 + \sigma_3 \pi (c^2 - b^2) |E_b|^2 \right\} = \\ = 1/2 \left\{ \sigma_1 \pi a^2 |E_a|^2 + \frac{1}{2} \pi (b^2 - a^2) \sigma_2 \int_{-1}^1 d\chi \{1 + \beta \chi\} |E_{S2}(r)|^2 + \sigma_3 \pi (c^2 - b^2) |E_b|^2 \right\}.$$

Тогда сопротивление переменному току равно:

$$(37) R_{AC} = P / (1/2 |I|^2).$$

Для получения приближенного решения уравнения (25) считаем, что параметр β настолько мал, что им можно пренебречь. Это предположение справедливо в случае, когда толщина ферромагнитного материала (материала 2) гораздо меньше его среднего радиуса. Тогда общее решение принимает вид

$$(38) E_{S2} = A e^{\alpha x} + B e^{-\alpha x}.$$

Следовательно

$$(39) E_a = A e^{-\alpha} + B e^{\alpha}; \text{ и}$$

$$(40) E_b = A e^{\alpha} + B e^{-\alpha}.$$

Подставляя формулы (38)-(40) в формулы (30) и (31), получаем следующий набор соотношений для A и B :

$$(41) \alpha (A e^{-\alpha} - B e^{\alpha}) = -j \gamma_a (A e^{-\alpha} + B e^{\alpha}); \text{ и}$$

$$(42) \alpha (A e^{\alpha} - B e^{-\alpha}) = j \gamma_b (A e^{\alpha} + B e^{-\alpha}) - j \tilde{I}.$$

Из формулы (41) выражаем B через A

$$(43) B = \frac{\alpha + j \gamma_a}{\alpha - j \gamma_a} e^{-2\alpha} A.$$

Перепишем последнее равенство следующим образом:

$$(44) B = \frac{\alpha_R - i \gamma_a^+}{\alpha_R + i \gamma_a^-} e^{-2\alpha_R + 2i\alpha_R} A,$$

где

$$(45) \gamma_a^{\pm} = \gamma_a \pm \alpha_R.$$

Если

$$(46) A = |A| \exp(i\phi_A)$$

и все возвращается к фазе A , тогда

$$(47) \phi_A = 0.$$

Из формулы (44)

$$(48) B = |B| \exp(i\phi_B), \text{ где}$$

$$(49) |B| = (\Gamma_+ / \Gamma_-) \exp(-2\alpha_R) |A|; \text{ и}$$

$$(50) \phi_B = 2\alpha_R - \phi_+ - \phi_-; \text{ где}$$

$$(51) \Gamma_{\pm} = \{\alpha_R^2 + (\gamma_a^{\pm})^2\}^{0.5}; \text{ и}$$

$$(52) \phi_{\pm} = \tan^{-1} \{\phi_{\pm} / \alpha_R\}.$$

Тогда

$$(53) E_a = |A| \exp(-\alpha_R + i\alpha_R) + |B| \exp\{\alpha_R + i(\phi_B - \alpha_R)\}; \text{ и}$$

$$(54) E_b = |A| \exp(\alpha_R - i\alpha_R) + |B| \exp\{-\alpha_R + i(\phi_B + \alpha_R)\};$$

Следовательно

$$(55A) \operatorname{Re}[E_a] = |A| \exp(-\alpha_R) \cos(\alpha_R) + |B| \exp(\alpha_R) \cos(\phi_B - \alpha_R);$$

$$(55B) \operatorname{Im}[E_a] = |A| \exp(\alpha_R) \sin(\alpha_R) + |B| \exp(\alpha_R) \sin(\phi_B - \alpha_R);$$

$$(55C) \operatorname{Re}[E_b] = |A| \exp(\alpha_R) \cos(\alpha_R) + |B| \exp(-\alpha_R) \cos(\phi_B + \alpha_R); \text{ и}$$

$$(55D) \operatorname{Im}[E_b] = -|A| \exp(\alpha_R) \sin(\alpha_R) + |B| \exp(-\alpha_R) \sin(\phi_B + \alpha_R).$$

Тогда отношение модулей значений токов, протекающих по центральному и внешнему проводникам, выражается следующим равенством:

$$(56) \frac{|I_1|}{|I_2|} = \frac{a^2 \sigma_1}{(c^2 - b^2) \sigma_3} \sqrt{\frac{\operatorname{Re}^2[E_a] + \operatorname{Im}^2[E_a]}{\operatorname{Re}^2[E_b] + \operatorname{Im}^2[E_b]}}.$$

Общий ток, протекающий по центральному проводнику, выражается следующим образом:

$$(57) I_2 = \sigma_2 \pi (b^2 - a^2) (A + B) \sinh(\alpha) / \alpha.$$

Имеем

$$(58) \sinh(\alpha) / \alpha = (1+i) \{ \sinh(\alpha_R) \cos(\alpha_R) - i \cosh(\alpha_R) \sin(\alpha_R) \} / (2\alpha_R) = (S^+ + S^- i), \text{ где}$$

$$(59) S^{\pm} = \{ \sinh(\alpha_R) \cos(\alpha_R) \pm i \cosh(\alpha_R) \sin(\alpha_R) \} / (4\alpha_R).$$

Следовательно

$$(60) \operatorname{Re}[I_2] = \sigma_2 \pi (b^2 - a^2) \{ |A| + |B| \cos(\phi_B) \} S^+ - |B| \sin(\phi_B) S^-; \text{ и}$$

$$(61) \operatorname{Im}[I_2] = \sigma_2 \pi (b^2 - a^2) \{ |A| + |B| \cos(\phi_B) \} S^- + |B| \sin(\phi_B) S^+.$$

Следовательно, среднеквадратическое значение тока равно

$$(62) I_{rms}^2 = \frac{1}{2} \{ (\operatorname{Re}[I_1] + \operatorname{Re}[I_2] + \operatorname{Re}[I_3])^2 + (\operatorname{Im}[I_1] + \operatorname{Im}[I_2] + \operatorname{Im}[I_3])^2 \}.$$

Далее формулы (40)-(42) используются для вычисления второго слагаемого в правой части формулы (36) (пренебрегая слагаемым β). Имеем

$$(63) P = \frac{1}{2} \{ \sigma_1 \pi a^2 |E_a|^2 + \pi (c^2 - b^2) \sigma_3 |E_b|^2 + \pi (b^2 - a^2) \sigma_2 (|A|^2 + |B|^2) \sinh(2\alpha_R) / (2\alpha_R) + 2 |A| |B| \sin(\phi_B + 2\alpha_R) / (\phi_B + 2\alpha_R) \}.$$

Делением правой части формулы (63) на правую часть формулы (62) получаем выражение для сопротивления переменному току (см. формулу (37)).

При заданных значениях размеров a , b и c и σ_1 , σ_2 и σ_3 , которые являются известными функциями температуры, и предполагая конкретное значение относительной магнитной проницаемости ферромагнитного материала (материал 2), или, что эквивалентно, глубины скин-слоя δ , можно установить $A = 1$ и можно вычислить сопротивление R_{AC} переменному току. Также может быть вычислено отношение среднеквадратичного значения тока, протекающего по внутреннему проводнику (материал 1) и ферромагнитному материалу (материал 2), к сумме. Таким образом, для заданного общего среднеквадратичного значения тока может быть вычислено среднеквадратичное значение тока, протекающего по материалам 1 и 2, что дает магнитное поле на поверхности материала 2. Используя данные о магнитном поле для материала 2, может быть выведено значение μ_2/μ_0 и, следовательно, может быть получено значение δ . Нарисовав эту глубину скин-слоя и исходную глубину скин-слоя, получаем пару кривых, которые пересекаются в истинном значении δ .

Данные по магнитному полю получены для углеродистой стали, выступающей в качестве ферромагнитного материала. Кривые зависимости B от H , а значит относительные проницаемости были получены из данных о магнитном поле при различных значениях температуры, доходящей до 593°C , и магнитных полях, доходящих до 200 Э (эрстед). Была получена взаимосвязь, которая хорошо согласуется с данными при максимальной проницаемости и далее. На фиг. 14 показаны примеры зависимости относительной магнитной проницаемости (ось y) от магнитного поля (Э) для полученных взаимосвязей и исходных данных для углеродистой стали. Данные, обозначенные позицией 274, представляют собой ис-

ходные данные для углеродистой стали при температуре 204°C. Данные, обозначенные позицией 276, представляют собой исходные данные для углеродистой стали при температуре 538°C. Кривая 278 представляет собой полученную взаимосвязь для углеродистой стали при температуре 204°C. Кривая 280 представляет собой полученную взаимосвязь для углеродистой стали при температуре 538°C.

Для размеров и материалов нагревательного элемента из меди/углеродистой стали/нержавеющей стали 347Н из описанных выше экспериментов были проведены описанные выше теоретические расчеты, что было сделано с целью вычисления зависимости магнитного поля на внешней поверхности углеродистой стали от глубины скин-слоя. Результаты теоретических расчетов представлены на том же графике в виде зависимости глубины скин-слоя от магнитного поля из взаимосвязей, примененных к данным о магнитном поле на фиг. 14. Теоретические расчеты и соотношения были получены для четырех значений температуры (93, 260, 427 и 593°C) и пяти среднеквадратичных значений тока (100, 200, 300, 400 и 500 А).

На фиг. 15 показаны получающиеся графики зависимости глубины скин-слоя (дюймы) от магнитного поля (Э) для всех четырех значений температуры и тока в 400 А. Кривая 282 иллюстрирует соотношение с данными магнитного поля при 93°C. Кривая 284 иллюстрирует соотношение с данными магнитного поля при 260°C. Кривая 286 иллюстрирует соотношение с данными магнитного поля при 427°C. Кривая 288 иллюстрирует соотношение с данными магнитного поля при 593°C. Кривая 290 иллюстрирует теоретический расчет на внешней поверхности углеродистой стали как функцию от глубины скин-слоя при 93°C. Кривая 292 иллюстрирует теоретический расчет на внешней поверхности углеродистой стали как функцию от глубины скин-слоя при 260°C. Кривая 294 иллюстрирует теоретический расчет на внешней поверхности углеродистой стали как функцию от глубины скин-слоя при 427°C. Кривая 296 иллюстрирует теоретический расчет на внешней поверхности углеродистой стали как функцию от глубины скин-слоя при 593°C.

Глубина скин-слоя, полученная на пересечениях кривых на фиг. 15 при одинаковых температурах, была подставлена в равенства, описанные выше, и было вычислено сопротивление переменному току на единицу длины. Далее было вычислено общее сопротивление переменному току всего нагревателя, включая сопротивление корпуса. Сравнение экспериментальных и численных (вычисленных) результатов показано на фиг. 16 для тока 300 А (экспериментальные данные 298 и численная кривая 300), 400 А (экспериментальные данные 302 и численная кривая 304) и 500 А (экспериментальные данные 306 и численная кривая 308). Хотя численные результаты демонстрируют более крутой наклон по сравнению с экспериментальными результатами, теоретическая модель дает результаты, близкие к экспериментальным данным, и итоговые значения достаточно обоснованы, принимая во внимание предположения теоретической модели. Например, одно предположение, использующее для расчета динамической системы проницаемость, полученную по квазистатической кривой зависимости В-Н.

Один признак теоретической модели, описывающей протекание переменного тока в нагревателе с ограничением температуры, состоящим из трех частей, заключается в том, что сопротивление переменному току не уменьшается монотонно при увеличении глубины скин-слоя. На фиг. 17 показана вычисленная по теоретической модели зависимость сопротивления переменному току (мОм) на фут нагревательного элемента от глубины скин-слоя (дюйм) при 593°C. Сопротивление переменному току можно максимизировать, выбирая глубину скин-слоя, то есть выбирая пик немонотонной части графика зависимости сопротивления от глубины скин-слоя (например, примерно 0,23 дюйма на фиг. 17).

На фиг. 18 показаны зависимости мощности на единицу длины (Вт/м), выделенной в каждом компоненте (кривая 310 (медный сердечник), кривая 312 (углеродистая сталь), кривая 314 (внешний слой из стали 347Н) и кривая 316 (общая)) до глубины скин-слоя (дюйм). Как ожидалось, при увеличении глубины скин-эффекта рассеяние энергии в компоненте из стали 347Н падает, в то время как рассеяние энергии в медном сердечнике растет. Максимальное рассеяние энергии в углеродистой стали имеет место тогда, когда глубина скин-слоя равна примерно 0,23 дюйма и предположительно соответствует минимуму коэффициента мощности, показанному на фиг. 12. Плотность тока в углеродистой стали ведет себя как затухающая волна с длиной волны $\lambda = 2\pi\delta$, и действие этой длины волны на граничные условия на границе медь/углеродистая сталь и углеродистая сталь/сталь 347Н может быть позади структуры на фиг. 17. Например, локальный минимум сопротивления переменному току близок к значению, при котором толщина слоя углеродистой стали соответствует $\lambda/4$.

Может быть получена формула, которая описывает зависимости сопротивления переменного тока от температуры для нагревателей с ограничением температуры и которая предназначена для использования при моделировании функционирования нагревателей в конкретном варианте осуществления изобретения. Данные на фиг. 10 и 11 показывают, что сопротивление сначала растет линейно, затем резко уменьшается до линий, характерных для постоянного тока. Зависимость сопротивления от температуры для каждого нагревателя может быть описана следующим образом:

$$(64) R_{AC} = A_{AC} + B_{AC}T; T \ll T_c; \text{ и}$$

$$(65) R_{AC} = R_{DC} = A_{DC} + B_{DC}T; T \gg T_c.$$

Заметим, что A_{DC} и B_{DC} не зависят от тока а A_{AC} и B_{AC} зависят от тока. Из формул (64) и (65) полу-

чаем следующее выражение для R_{AC} :

$$R_{AC} = \frac{1}{2} \{1 + \tanh\{\alpha(T_0 - T)\}\} \{A_{AC} + B_{AC}T\} + \frac{1}{2} \{1 - \tanh\{\alpha(T_0 - T)\}\} \{A_{DC} + B_{DC}T\} \quad T \leq T_0; \text{ и}$$

$$R_{AC} = \frac{1}{2} \{1 + \tanh\{\beta(T_0 - T)\}\} \{A_{AC} + B_{AC}T\} + \frac{1}{2} \{1 - \tanh\{\beta(T_0 - T)\}\} \{A_{DC} + B_{DC}T\} \quad T \geq T_0.$$

Так как A_{AC} и B_{AC} зависят от тока, то

$$(67) A_{AC} = A_{AC}^{(0)} + A_{AC}^{(1)}I; B_{AC} = B_{AC}^{(0)} + B_{AC}^{(1)}I.$$

Параметр α также зависит от тока и эта зависимость является квадратичной

$$(68) \alpha = \alpha_0 + \alpha_1 I + \alpha_2 I^2.$$

Параметры β , T_0 , а также A_{DC} и B_{DC} не зависят от тока. Значения параметров для нагревателей из меди/углеродистой стали/стали 347Н из описанных выше экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Единица	медь/углеродистая сталь/ сталь 347Н
A_{DC}	мОм	0.6783
B_{DC}	мОм/°F	6.53×10^{-4}
$A_{AC}^{(0)}$	мОм	3.6358
$A_{AC}^{(1)}$	мОм/А	-1.247×10^{-3}
$B_{AC}^{(0)}$	мОм/°F	2.3575×10^{-3}
$B_{AC}^{(1)}$	мОм/(°FА)	-2.28×10^{-7}
α_0	1/°F	0.2
α_1	1/(°FА)	-7.9×10^{-4}
α_2	1/(°FА ²)	8×10^{-7}
β	1/°F	0.017
T_0	°F	1350

На фиг. 19А-19С сравниваются результаты теоретических вычислений по формулам (66)-(68) и экспериментальные данные при токе 300 А (фиг. 19А), 400 А (фиг. 19В) и 500 А (фиг. 19С). На фиг. 19А показана зависимость электрического сопротивления (мОм) от температуры (°F) при токе 300 А. Данные, обозначенные позицией 318, представляют собой экспериментальные данные при токе 300 А. Кривая 320 построена по теоретическим вычислениям при токе 300 А. Кривая 322 является графиком зависимости сопротивления от температуры при постоянном токе 10 А. На фиг. 19В показана зависимость электрического сопротивления (мОм) от температуры (°F) при токе 400 А. Данные, обозначенные позицией 324, представляют собой экспериментальные данные при токе 400 А. Кривая 326 построена по теоретическим вычислениям при токе 400 А. Кривая 328 является графиком зависимости сопротивления от температуры при постоянном токе, равном 10 А. На фиг. 19С показана зависимость электрического сопротивления (мОм) от температуры (°F) при токе в 500 А. Данные, помеченные ссылкой позицией 330, представляют собой экспериментальные данные при токе в 500 А. Кривая 332 построена по теоретическим вычислениям при токе в 500 А. Кривая 334 является графиком зависимости сопротивления от температуры при постоянном токе, равном 10 А. Заметим, что для получения сопротивления на фут, например, при моделировании сопротивления, данные, полученные в результате теоретических вычислений, надо разделить на шесть.

В свете настоящего описания специалистам в рассматриваемой области могут быть ясны дополнительные модификации и альтернативные варианты осуществления различных аспектов настоящего изобретения. Соответственно, это описание рассматривается только с иллюстративной точки зрения и с целью обучения специалистов в рассматриваемой области общему способу осуществления этого изобретения. Ясно, что показанные и описанные здесь формы изобретения надо рассматривать как предпочтительные в настоящее время варианты осуществления изобретения. Показанные и описанные здесь элементы и материалы могут быть заменены, части и способы могут быть изменены и некоторые отличительные признаки изобретения могут быть использованы независимо, что ясно специалисту в рассматриваемой области после понимания описания настоящего изобретения. В описанные здесь элементы могут быть внесены изменения, которые не выходят за пределы объема и новизны изобретения, которые описаны в прилагаемой формуле изобретения. Кроме того, ясно, что описанные здесь независимые отличительные признаки могут быть объединены в некоторых вариантах осуществления изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Нагреватель (202), содержащий ферромагнитный проводник, электрический проводник (244), электрически соединенный с ферромагнитным проводником (242), причем электрический проводник (244) представляет собой оболочку (246), по меньшей мере, час-

тично окружающую ферромагнитный проводник (242), благодаря чему электромагнитное поле, создаваемое изменяющимся во времени током в ферромагнитном проводнике (242), ограничивает большую часть электрического тока электрическим проводником (244) при температуре, меньшей или близкой к температуре Кюри ферромагнитного проводника (242),

при этом нагреватель (202) выполнен с возможностью передачи теплоты от нагревателя (202) в часть пласта (220) с целью нагревания указанной части пласта (220) до температуры, превышающей температуру окружающей среды указанной части пласта (220),

причем нагреватель (220) содержит внутренний электрический проводник (252), который, по меньшей мере, частично окружен и электрически соединен с ферромагнитным проводником (242),

отличающийся тем, что внутренний электрический проводник (252) содержит опорный элемент, который обеспечивает механическую прочность при температуре, равной или близкой к температуре Кюри ферромагнитного проводника (242), для поддержания нагревателя (202).

2. Нагреватель по п.1, в котором внутренний электрический проводник (252) содержит дисперсионно-упрочненную медь и/или волокно из меди с вольфрамом.

3. Нагреватель по любому из пп.1-2, который дополнительно содержит оболочку (248), по меньшей мере, частично окружающую электрический проводник (244), причем оболочка (248) содержит коррозионно-стойкий материал.

4. Нагреватель по любому из пп.1-3, который дополнительно содержит электрическую изоляцию, которая, по меньшей мере, частично окружает электрический проводник (244).

5. Нагреватель по п.4, который дополнительно содержит электропроводную оболочку, по меньшей мере, частично окружающую электрическую изоляцию, при этом электрическая изоляция электрически изолирует оболочку от электрического проводника.

6. Нагреватель по любому из пп.1-5, в котором отношение наибольшего сопротивления переменному току или модулированному постоянному току при температуре ниже температуры Кюри к наименьшему сопротивлению при температуре выше температуры Кюри для заданного тока составляет по меньшей мере 1.1.

7. Нагреватель по любому из пп.1-6, в котором электрический проводник (244) полностью окружает ферромагнитный проводник (242).

8. Нагреватель по любому из пп.1-7, в котором ферромагнитный проводник (242) и электрический проводник (244) соединены по длине.

9. Нагреватель по любому из пп.1-8, отличающийся тем, что выполнен так, чтобы располагаться в отверстии (216) в пласте (220).

10. Способ управления нагревателем (202) по любому из пп.1-9, характеризующийся тем, что оценивают электрическую характеристику нагревателя (202) в пласте, при этом нагреватель (202) выполнен так, чтобы нагревать по меньшей мере часть пласта (220);

сравнивают оцененную электрическую характеристику с прогнозируемым поведением указанной электрической характеристики и управляют нагревателем (220) на основе указанного сравнения.

11. Способ по п.10, в котором электрическая характеристика представляет собой сопротивление нагревателя (202).

12. Способ по п.10 или 11, в котором электрическая характеристика представляет собой коэффициент мощности нагревателя (202).

13. Способ по любому из пп.10-12, который дополнительно включает в себя оценивание электрической характеристики на основе электрических измерений нагревателя (202).

14. Способ по любому из пп.10-13, который дополнительно включает в себя оценивание прогнозируемого поведения указанной электрической характеристики с использованием экспериментальных измерений, аналитических формул и/или моделирования.

15. Способ по любому из пп.10-14, в котором прогнозируемое поведение электрической характеристики оценивают как функцию температуры нагревателя (202).

16. Способ по любому из пп.10-15, в котором путем сравнения оцененной электрической характеристики с прогнозируемым поведением указанной электрической характеристики оценивают температуру нагревателя (202).

17. Способ по любому из пп.10-16, в котором управление нагревателем (202) включает в себя управление током и/или мощностью, подаваемой на нагреватель (202).

18. Способ по любому из пп.10-17, в котором оцененная электрическая характеристика является процентным соотношением длины части нагревателя, имеющей температуру, близкую или превышающую температуру Кюри, к общей длине нагревателя.

19. Способ управления нагревателем по любому из пп.1-9, в котором оценивают электрическую характеристику нагревателя в пласте, отличающийся тем, что дополнительно оценивают прогнозируемое поведение указанной электрической характеристики с использованием экспериментальных измерений, аналитических формул и/или моделирования,

сравнивают оцененную электрическую характеристику с прогнозируемым поведением указанной

электрической характеристики и

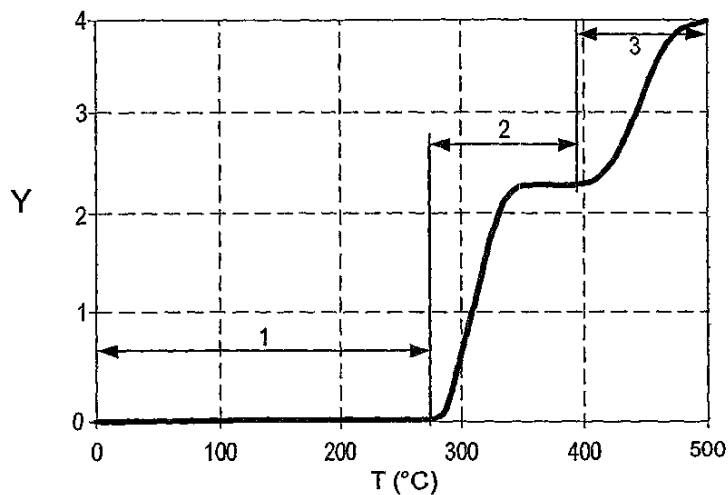
управляют нагревателем на основе указанного сравнения,

причем прогнозируемое поведение указанной электрической характеристики оценивают как функцию температуры нагревателя.

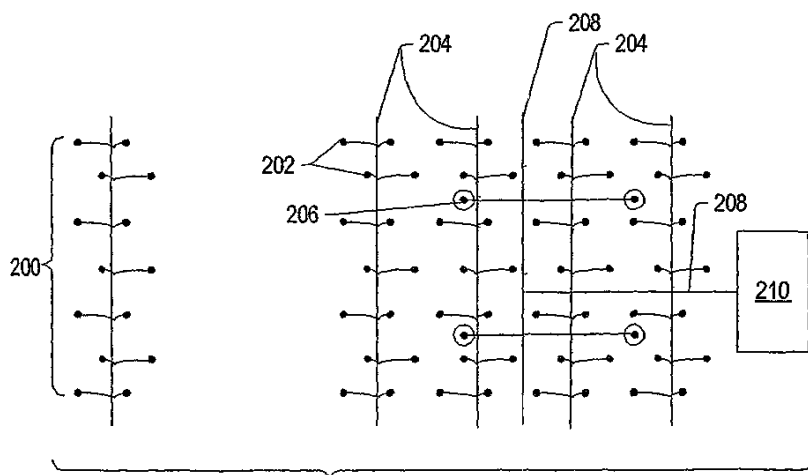
20. Способ нагрева подземного пласта (220) с использованием нагревателя (202) по любому из пп.1-9, в котором нагреватель размещают в подземном пласте.

21. Способ по п.20, в котором подземный пласт (220) содержит углеводороды, при этом способ дополнительно включает в себя передачу теплоты в пласт (220) таким образом, чтобы, по меньшей мере, некоторые углеводороды участвовали в реакции пиролиза в пласте (220).

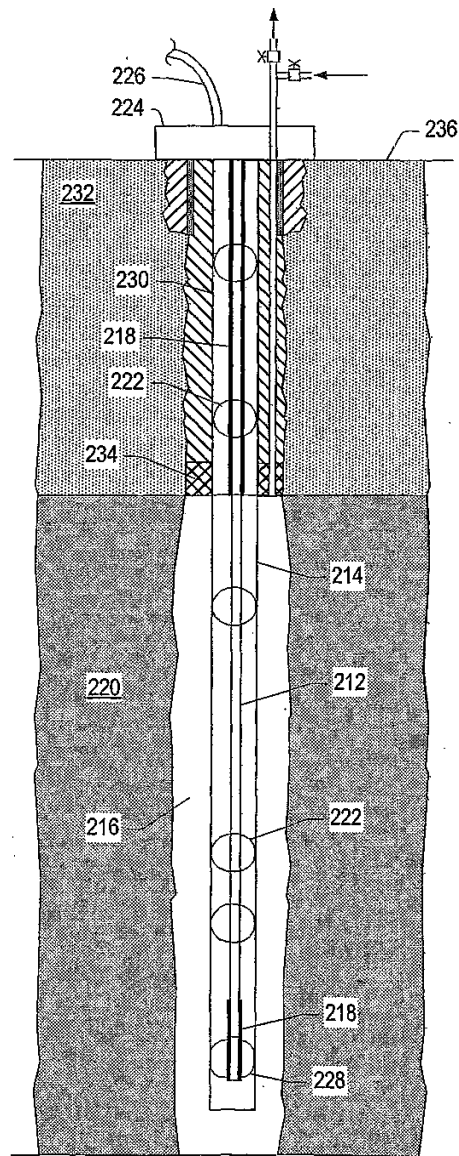
22. Способ по п.20 или 21, дополнительно включающий добычу флюида из пласта (220).



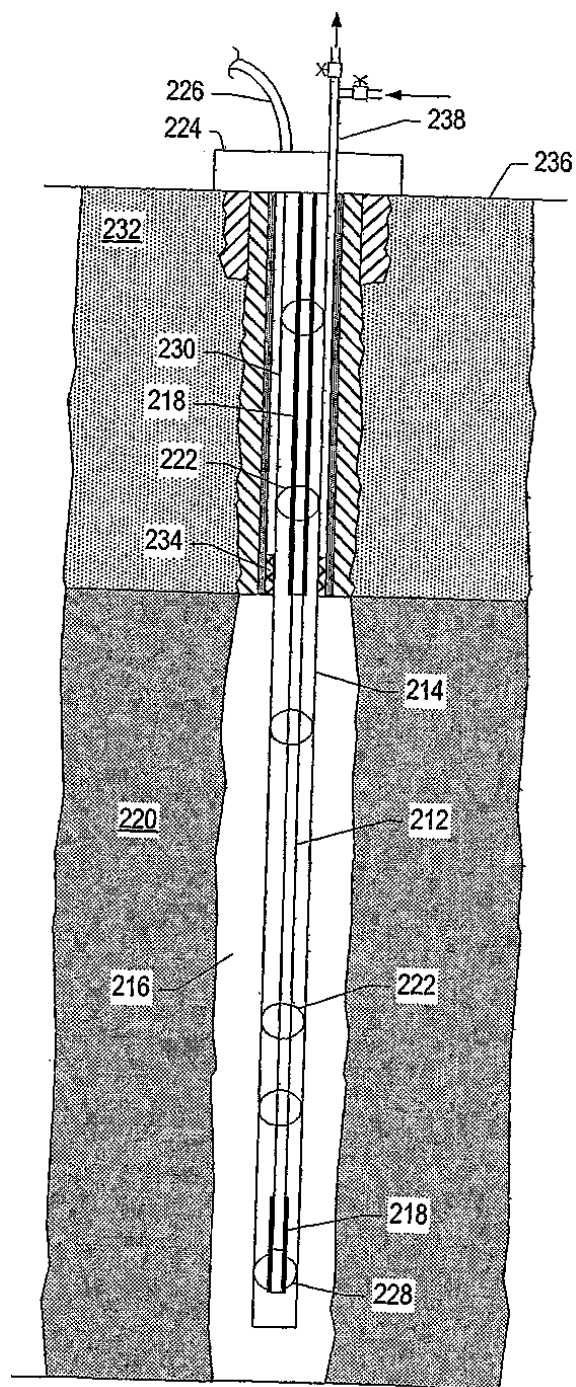
Фиг. 1



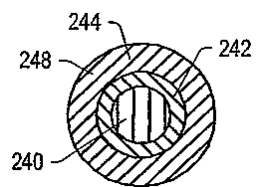
Фиг. 2



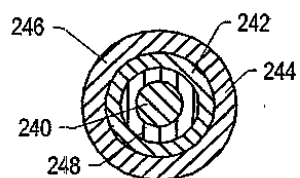
Фиг. 3



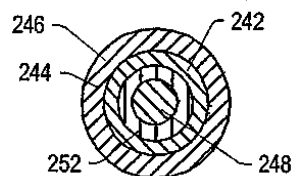
Фиг. 4



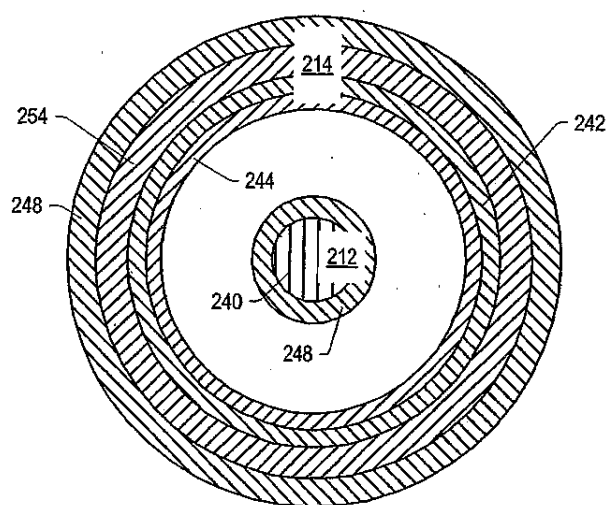
Фиг. 5



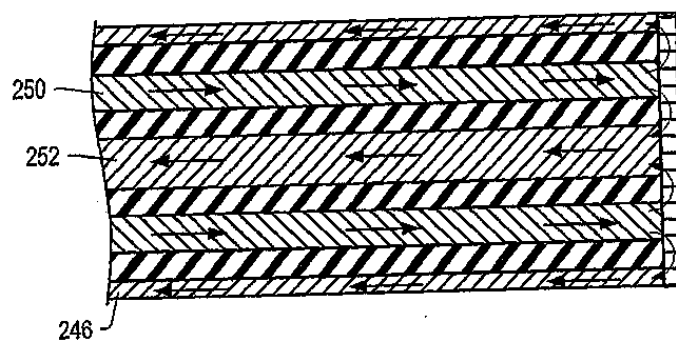
Фиг. 6



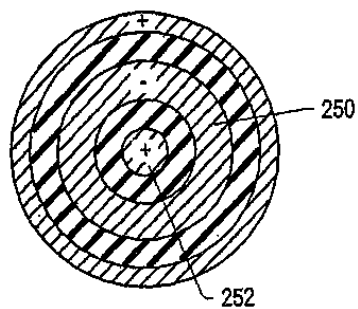
Фиг. 7



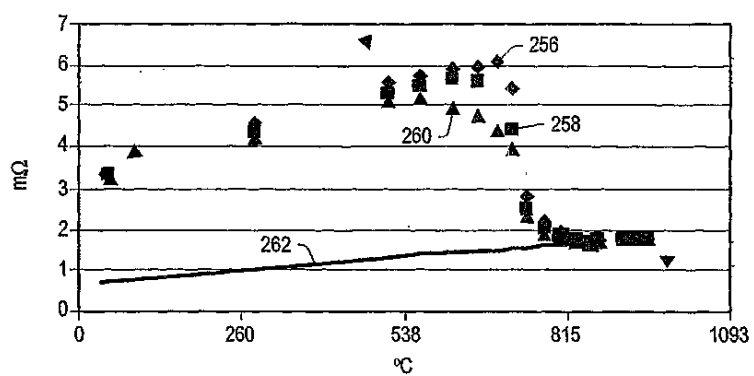
Фиг. 9



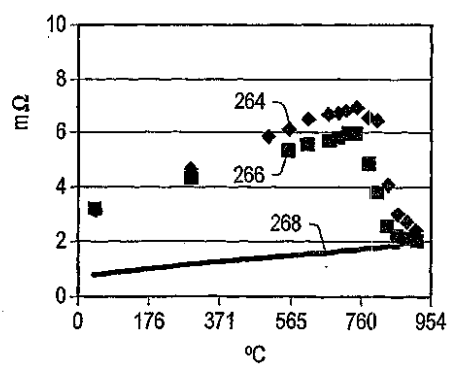
Фиг. 8А



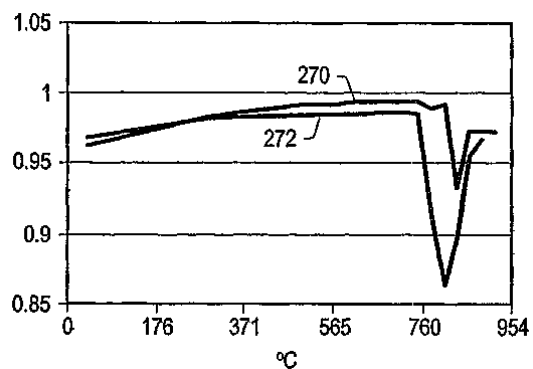
Фиг. 8В



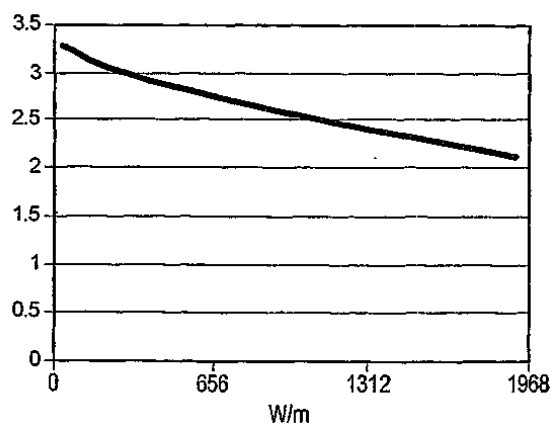
Фиг. 10



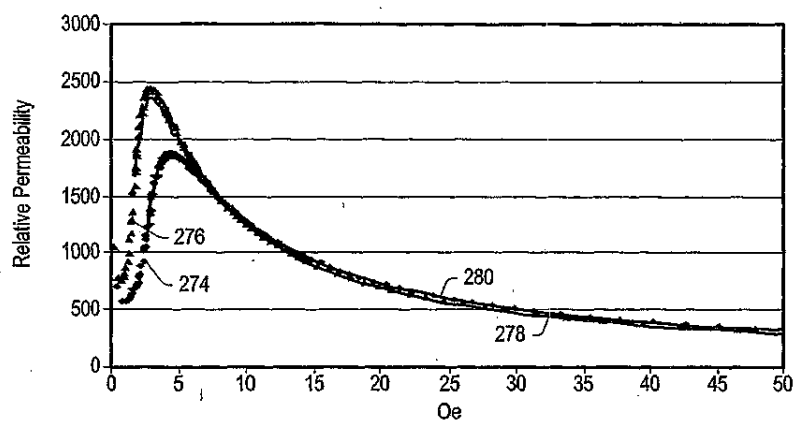
Фиг. 11



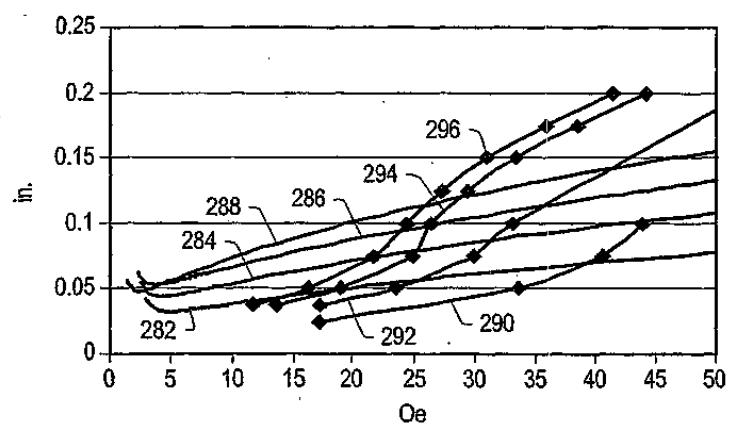
Фиг. 12



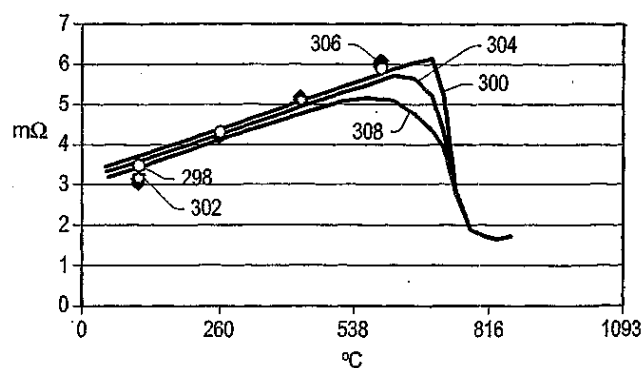
Фиг. 13



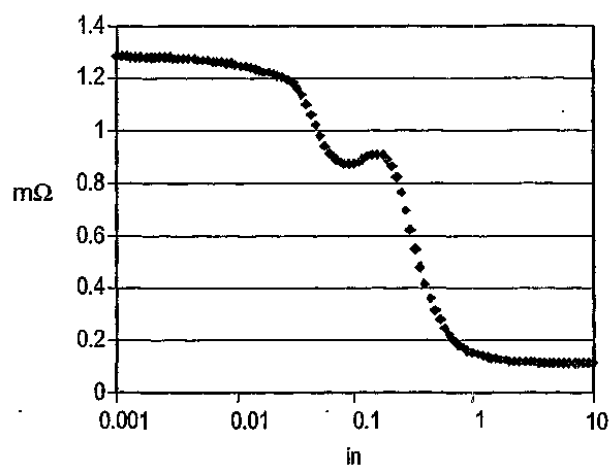
Фиг. 14



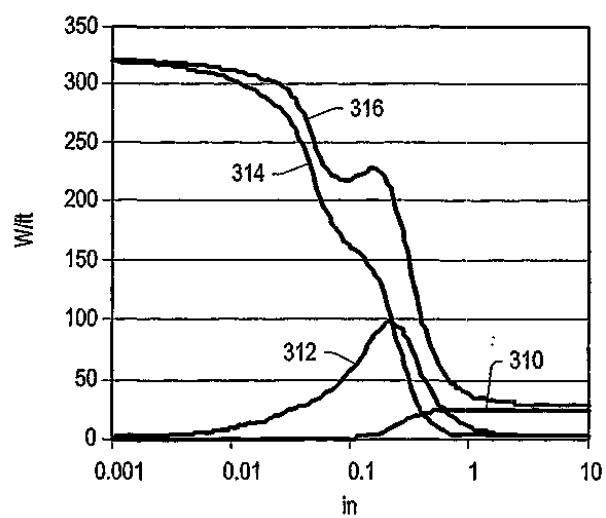
Фиг. 15



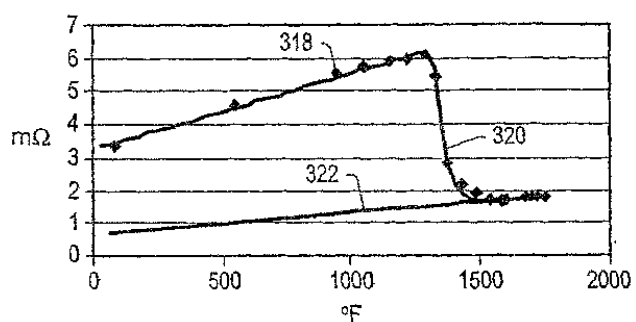
Фиг. 16



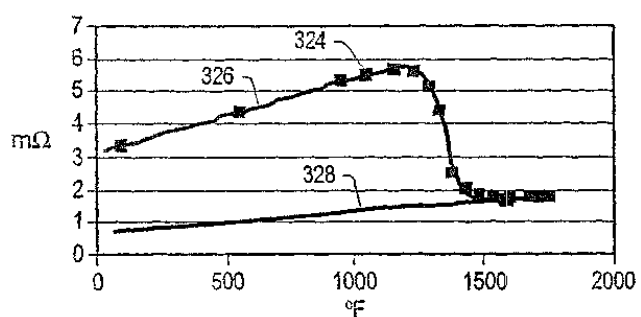
Фиг. 17



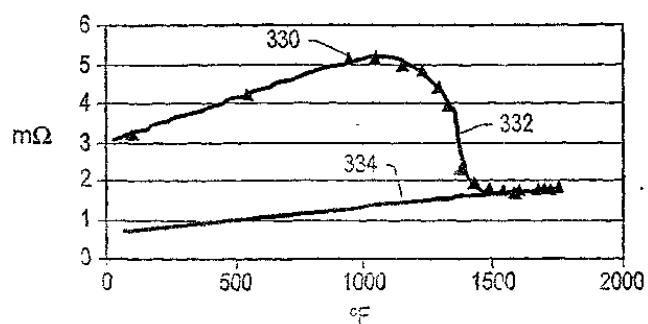
Фиг. 18



Фиг. 19А



Фиг. 19В



Фиг. 19С



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

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