

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **044880**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.10.09

(51) Int. Cl. **G21C 3/04 (2006.01)**
G21C 3/18 (2006.01)

(21) Номер заявки
202293160

(22) Дата подачи заявки
2021.06.04

(54) **ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

(31) **2020136162**

(56) **RU-C2-2244347**

(32) **2020.11.02**

RU-C1-2143142

(33) **RU**

RU-C1-2136060

(43) **2023.07.03**

RU-C1-2691628

(86) **PCT/RU2021/000242**

RU-C1-2481654

(87) **WO 2022/093064 2022.05.05**

EA-B1-032448

US-A1-20170287578

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ТВЭЛ" (RU)**

(72) Изобретатель:
**Новиков Владимир Владимирович,
Кузнецов Владимир Иванович,
Медведев Анатолий Васильевич,
Лаговский Виктор Борисович,
Гизатуллин Тимур Тагирович,
Сергиенко Иван Романович (RU)**

(74) Представитель:
Вербицкий С.В. (RU)

(57) Изобретение относится к ядерной технике к твэлам реактора ВВЭР-1200 и касается усовершенствования конструкций твэлов реактора ВВЭР-1000. Сущность: изменена конструкция нижней заглушки, увеличена длина твэлов, а также длина топливного столба и его масса, которые обеспечивают увеличенную тепловую мощность реактора до 3300 МВт. Формируемая из тепловыделяющих сборок активная зона выполнена с учетом повышенной тепловой мощности реактора, увеличенной высоты твэлов в тепловыделяющих сборках и может использоваться в корпусе реактора, аналогичном по геометрическим размерам штатному корпусу реактора ВВЭР-1000. В результате повышается выгорание топлива, обеспечивается возможность увеличения тепловой мощности реактора до ≈ 3300 МВт и увеличение энерговыработки реакторной установки в целом при сохранении габаритов корпуса реактора ВВЭР-1000 и прежнего уровня безопасности.

044880
B1

044880
B1

Область техники

Изобретение относится к ядерной технике и касается усовершенствования конструкции тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), входящих в состав модернизированной тепловыделяющей сборки (ТВС), из которых набирается активная зона в водоохлаждаемом корпусном ядерном реакторе повышенной мощности, а именно ВВЭР-1200.

Предшествующий уровень техники

Перспектива развития ядерной энергетики в значительной мере определяется решением вопроса увеличения энерговыработки и сохранением прежнего уровня безопасности атомных электростанций (АЭС).

Проблема повышения уровня экономической эффективности на действующих АЭС с реакторами ВВЭР имеет различные пути решения. Однако в настоящее время она решается, как правило, минимальным изменением конструктивных элементов активной зоны. Подобный подход позволяет более эффективно использовать имеющиеся ресурсы, не прибегая к существенной корректировке технологических процессов при изготовлении конструктивных элементов.

В настоящее время в ядерных реакторах типа ВВЭР применяются стержневые тепловыделяющие элементы. Стержневой ТВЭЛ имеет топливный столб, состоящий из отдельных таблеток цилиндрической формы, размещенных в оболочке, которая является конструкционным несущим элементом (см. А.Г. Самойлов. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - С. 99-107). Диаметр стержневых ТВЭЛ в целях увеличения поверхности теплообмена и снижения температурных напряжений, вызванных перепадом температур, принимается возможно меньшим и варьируется в реальных конструкциях водо-водяных реакторов с водой под давлением от $7,35 \times 10^{-3}$ до 15×10^{-3} м (см. Г.Н. Ушаков. Технологические каналы и тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. - М.: Энергоиздат, 1981. - С. 32-36). Конструкции стержневых ТВЭЛ, ТВС и самой активной зоны для реакторов ВВЭР должны обеспечивать механическую устойчивость и прочность ТВЭЛ, в том числе в аварийных условиях при высоких температурах.

Известен тепловыделяющий элемент ядерного реактора, содержащий герметичную оболочку, ядерное топливо в виде цилиндрических таблеток, набранных в столб по длине оболочки и удерживаемых в заданном положении фиксатором в виде разрезных втулок. Оболочка тепловыделяющего элемента выполнена из сплава циркония (RU 2244347, G21C3/00, 24.10.2002).

Недостатком известного тепловыделяющего элемента является то, что данный ТВЭЛ имеет фиксатор в виде разрезной втулки, который в отличие от пружинного фиксатора не обеспечивает сплошность топливного столба при его возможном смещении во время проведения транспортно-технологических операций как на свежем, так и на облученном топливе.

Также недостатком является изменение наружного диаметра оболочки ТВЭЛ, который варьируется от $7,00 \times 10^{-3}$ до $8,79 \times 10^{-3}$, что влечет за собой значительную корректировку технологии изготовления всех элементов конструкции ТВЭЛ, что приводит к усложнению технологии его изготовления по сравнению с существующей.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату является тепловыделяющий элемент активной зоны водо-водяных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000 (Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. - М.: ИКЦ "Академкнига", 2004. - С. 106), который состоит из следующих частей: верхняя заглушка, оболочка, нижняя заглушка, топливный столб, набранный из таблеток диоксида урана и фиксатора. Оболочка и заглушки изготовлены из сплава Э110. Для предотвращения смятия оболочки в процессе эксплуатации внутренний объем ТВЭЛ заполняется гелием под давлением $(2,00 \pm 0,25)$ МПа. Герметизация ТВЭЛ осуществляется сваркой. Для снижения давления газообразных продуктов деления под оболочкой, выделяющихся в процессе эксплуатации, в верхней части ТВЭЛ предусмотрен компенсационный объем. Фиксация топливного столба от действия транспортно-технологических нагрузок осуществляется фиксатором. Верхняя заглушка предусматривает возможность сцепления с захватом устройства извлечения - установки ТВЭЛ при сборке ТВС. Нижняя заглушка устанавливается в нижнюю решетку и крепится шплинтовкой.

Недостатками является то, что в ТВЭЛ реактора ВВЭР-1000 длина ТВЭЛ и топливного столба меньше, чем у ТВЭЛ реактора ВВЭР-1200, тем самым суммарная загрузка топлива в активную зону меньше, что приводит к уменьшению энерговыработки водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-1000 по сравнению с ВВЭР-1200. Использование в качестве материала оболочки сплава Э110, в котором содержание гафния больше, чем в сплаве Э110 о.ч., приводит к повышенному поглощению нейтронов оболочкой ТВЭЛ, что также приводит к уменьшению энерговыработки реактора. Крепление нижней заглушки к опорной решетке шплинтовкой приводит к более сложному и трудоемкому процессу сборки и разборки ТВЭЛ в составе ТВС.

Раскрытие изобретения

Задачей изобретения является разработка и создание нового тепловыделяющего элемента водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-1200 с повышенной энерговыработкой и сохранением прежнего уровня безопасности, а также упрощение процесса сборки свежей (необлученной) ТВС за счет опти-

мизации конструкции твэла с использованием имеющегося технологического оборудования.

Техническим результатом является увеличение энергоэффективности и выгорания топлива с сохранением надежности и безопасной эксплуатации тепловыделяющего элемента водо-водяного энергетического реактора, а также упрощение процесса сборки свежей ТВС.

Технический результат достигается тем, что тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора состоит из цилиндрической оболочки, загерметизированной нижней и верхней заглушками, концентрично приваренными к оболочке с инертной атмосферой внутри тепловыделяющего элемента, и содержит концентрично размещенный в цилиндрической оболочке топливный столб, набранный из топливных таблеток с центральным отверстием, при этом топливный столб в осевом направлении поджат к нижней заглушке пружинным фиксатором, который состоит из витков компенсирующей группы, обеспечивающих осевое усилие поджатия топливного столба, и витков фиксирующей группы, обеспечивающих удержание пружинного фиксатора в определенном положении за счет посадки с натягом на внутреннюю поверхность цилиндрической оболочки, причем оболочка и заглушки соединены контактно стыковой сваркой, при этом длина сварного соединения составляет от одной до трех толщин стенки оболочки, причем зона сварного соединения не выступает за диаметр исходной оболочки, а нижняя заглушка представляет собой элемент цангового типа, в нижней части которого выполнен буртик ступенчатого профиля и прорезь, расположенная в плоскости на продольной оси, выходящая на нижний торец.

Длина твэла L_0 составляет от 4030 до 4036 мм.

Длина топливного столба L_1 составляет от 3720 до 3740 мм.

Длина свободного объема под оболочкой тепловыделяющего элемента L_2 составляет от 250 до 270 мм.

Длина оболочки L_3 составляет от 3995 до 4005 мм.

Масса топливного столба составляет от 1600 до 1800 г.

Цилиндрическая оболочка выполнена из циркониевого сплава Э110 о.ч., состоящего из циркония с добавлением основных примесей в следующем соотношении, мас. %: цирконий - основа; ниобий - 0,8-1,5; железо - 0,02-0,08; кислород - 0,05-0,1; углерод - до 0,01; кремний - до 0,02; гафний - до 0,010.

Пружинный фиксатор выполнен из нержавеющей стали.

Виток пружинного фиксатора, контактирующий с верхней топливной таблеткой, поджат до контакта и подшлифован, образуя плоскость контакта витка и топливной таблетки.

В качестве инертного газа под оболочкой используют гелий с массовой долей в конечном изделии в диапазоне от 90 до 99%.

Указанная совокупность признаков является новой, неизвестной из уровня техники и решает поставленную задачу, так как

увеличение длины топливного столба и твэла обеспечивает увеличение суммарной загрузки топлива в активную зону; расчетное обоснование показало, что при сравнительно большей загрузке топлива обеспечиваются аналогичные твэлам реактора ВВЭР-1000 показатели работоспособности и надежности, а срок эксплуатации и выгорание топлива выше для аналогичных параметров у твэлов реактора ВВЭР-1200;

использование в качестве материала оболочки сплава Э110 о.ч. позволяет понизить поглощение нейтронов оболочкой за счет снижения количества гафния, что приводит к увеличению энерговыработки;

использование в конструкции твэла нижней заглушки цангового типа позволяет обеспечить сборку твэлов в пучок и их надежную фиксацию без дополнительных инструментов и фиксирующих элементов (шплинтовка и т.д.);

использование контактно стыковой сварки позволяет повысить надежность и упростить технологический процесс сборки твэла;

при установке фиксатора происходит нагартовка внутренней поверхности оболочки на участке от нижнего торца верхней заглушки до участка фиксирующей группы витков включительно, что увеличивает запасы прочности по критерию потери устойчивости при гидроиспытаниях;

установка фиксатора происходит так, что крайний поджатый до контакта и подшлифованный виток пружинного фиксатора контактирует с верхней топливной таблеткой, образуя плоскость контакта витка и топливной таблетки, что позволяет повысить надежность твэла;

использование в качестве инертного газа под оболочкой гелия с массовой долей в конечном изделии в диапазоне от 90 до 99% повышает теплопроводность и коррозионную стойкость внутренней поверхности оболочки твэла;

выбранная длина сварного соединения, составляющая от одной до трех толщин стенки оболочки, причем зона сварного соединения не выступает за диаметр исходной оболочки, обеспечивает надежность и безопасную эксплуатацию тепловыделяющего элемента.

Осуществление изобретения

Подтверждение достижения технического результата отображено в табл. 1 и 2, в которых представлены рассчитанные проектные параметры в сравнении для твэлов реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Таблица 1

Расчетное выгорание		
Элемент	Выгорание топлива с учетом коэффициентов запаса, МВт·сут/кгU	
	ВВЭР-1200	ВВЭР-1000
Твэл	80,4	74,0
Таблетка твэла	89,1	82,0

Таблица 2

Расчетные коэффициенты запаса в стационарных условиях эксплуатации по теплофизическим, прочностным и деформационным критериям

Наименование критерия приемки	Нормативный коэффициент запаса	Расчетный коэффициент запаса ВВЭР-1200	Расчетный коэффициент запаса ВВЭР-1000
Температура плавления	$k_{TC1} = 1,1$	1,76	1,74
Коррозия оболочки	$k_{КС1} = 1,5$	2,0	$\gg 1,5$
КРН	$k_{SC1} = 1,2$	1,40	1,31
Устойчивость	$k_{SC3} = 1,5$	1,71	1,67
Удлинение	$k_{DC2} = 1,25$	1,59	1,34

Сравнение данных в табл. 1 показывает увеличение предельного расчетного выгорания как в среднем по твэлу, так и по таблетке для реактора ВВЭР-1200 по сравнению с реактором ВВЭР-1000. В табл. 2 представлено сравнение коэффициентов запаса для проектных критериев работоспособности, из которой видно, что для твэлов реактора ВВЭР-1200 расчетные коэффициенты запаса выше нормативных и выше таковых для твэлов реактора ВВЭР-1000.

На фиг. 1 изображен вариант продольного разреза заявляемого твэла для реактора ВВЭР-1200.

На фиг. 2 изображено увеличенное изображение нижней заглушки.

На фиг. 3 изображен разрез нижней заглушки.

На фиг. 4 представлены расчетные удлинения твэлов в зависимости от выгорания для твэлов реактора ВВЭР-1200.

На фиг. 5 представлены расчетные удлинения твэлов в зависимости от выгорания для твэлов реактора ВВЭР-1000.

На фиг. 6 представлены расчетные изменения диаметра оболочки твэлов в зависимости от выгорания для твэлов реактора ВВЭР-1200.

На фиг. 7 представлены расчетные изменения диаметра оболочки твэлов в зависимости от выгорания для твэлов реактора ВВЭР-1000.

На фиг. 8 представлены расчетные окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки стационарного цикла перегрузок для твэлов реактора ВВЭР-1200.

На фиг. 9 представлены расчетные окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки стационарного цикла перегрузок для твэлов реактора ВВЭР-1000.

На фиг. 10 представлены расчетные величины давления газа для твэлов реактора ВВЭР-1200 стационарного цикла для холодного и горячего состояний.

На фиг. 11 представлены расчетные величины давления газа для твэлов реактора ВВЭР-1000 стационарного цикла перегрузок для холодного и горячего состояний.

Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора (фиг. 1) состоит из следующих конструктивных элементов:

топливный столб, набранный из топливных таблеток (4) с центральным отверстием;

пружинный фиксатор (5);

цилиндрическая оболочка (3);

верхняя (1) и нижняя заглушки (2).

Топливный столб размещается в оболочке (3) твэла, нижняя топливная таблетка (4) своим нижним торцом касается нижней заглушки (2), верхняя топливная таблетка (4) касается пружинного фиксатора (5), который посредством натяга закреплен в цилиндрической оболочке (3) и обеспечивает поджатие и сохранение сплошности топливного столба. Верхняя (1) и нижняя (2) заглушки герметично сварены в цилиндрическую оболочку (3), тем самым обеспечивая герметичную полость внутри тепловыделяющего элемента. При приварке верхней заглушки (1) к цилиндрической оболочке (3) внутрь твэла подается инертный газ под давлением для обеспечения коррозионной стойкости, прочности твэла и теплопроводности. Особенностью нижней заглушки (2) является то, что она имеет

прорезь (7), длина которой L_4 от 9 до 13 мм;

цилиндрическое углубление (6), длина которого L_5 от 9 до 13 мм;

цанговую часть (9), длина которой L_6 от 15 до 16 мм;

буртик с конической частью (8).

Нижняя заглушка (2) твэла при сборке ТВС за счет упругости цанговой части с прорезью фиксиру-

ется в опорной решетке ТВС. При сборке твэла в ТВС происходит сжатие прорези и уменьшение наружного диаметра буртика до соответствующего внутреннему диаметру решетки ТВС, после чего происходит проталкивание цанговой части заглушки в решетку ТВС до упора, после чего прорезь разжимается до исходного состояния и восстанавливается исходный наружный диаметр буртика, буртик упирается в решетку ТВС, тем самым удерживая нижнюю заглушку и твэл от осевого перемещения.

Наличие нижней заглушки описанной конструкции позволяет достичь одной из поставленных задач - упрощения процесса сборки свежей ТВС.

Промышленная применимость

С учетом расчетных данных, представленных на фиг. 4-11, можно утверждать, что в нормальном режиме эксплуатации, по сравнению с конструкцией тепловыделяющих элементов реактора ВВЭР-1000, уменьшено удлинение твэлов, значение изменения их диаметра, снижены окружные напряжения, а внутреннее давление не увеличилось для твэлов ВВЭР-1200. В том числе снижено предельное значение энерговыделения твэлов, оболочки которых являются одним из основных барьеров на пути распространения радиоактивных веществ и могут разгерметизироваться в аварийных ситуациях, прежде всего из-за их перегрева. Такое решение обусловлено повышением требований к уровню безопасности АЭС и многолетним успешным опытом эксплуатации ядерного топлива существующей конструкции.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора, состоящий из цилиндрической оболочки, загерметизированной нижней и верхней заглушками, концентрично приваренными к оболочке с инертной атмосферой внутри тепловыделяющего элемента, содержащий концентрично размещенный в цилиндрической оболочке топливный столб, набранный из топливных таблеток с центральным отверстием, при этом топливный столб в осевом направлении поджат к нижней заглушке пружинным фиксатором, который состоит из витков компенсирующей группы, обеспечивающих осевое усилие поджатия топливного столба, и витков фиксирующей группы, обеспечивающих удержание пружинного фиксатора в определенном положении за счет посадки с натягом на внутреннюю поверхность цилиндрической оболочки, отличающийся тем, что оболочка и заглушки соединены контактно стыковой сваркой, при этом длина сварного соединения составляет от одной до трех толщин стенки оболочки, причем зона сварного соединения не выступает за диаметр исходной оболочки, а нижняя заглушка представляет собой элемент цангового типа, в нижней части которого выполнен буртик ступенчатого профиля и прорезь, расположенная в плоскости на продольной оси, выходящая на нижний торец.

2. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что длина твэла L_0 составляет от 4030 до 4036 мм.

3. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что длина топливного столба L_1 составляет от 3720 до 3740 мм.

4. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что длина свободного объема под оболочкой тепловыделяющего элемента L_2 составляет от 250 до 270 мм.

5. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что длина оболочки L_3 составляет от 3995 до 4005 мм.

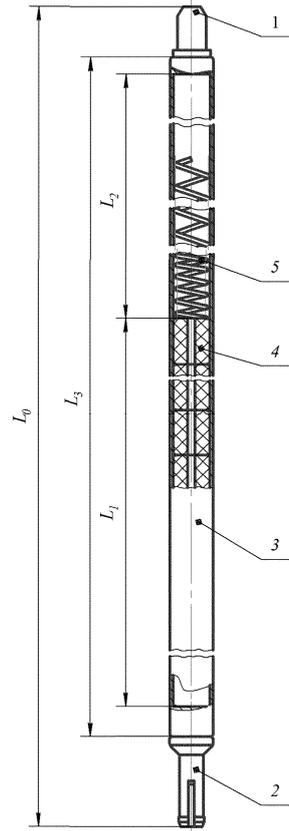
6. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что масса топливного столба составляет от 1600 до 1800 г.

7. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что цилиндрическая оболочка выполнена из циркониевого сплава Э110 о.ч., состоящего из циркония с добавлением основных примесей в следующем соотношении, мас. %: цирконий - основа; ниобий - 0,8-1,5; железо - 0,02-0,08; кислород - 0,05-0,1; углерод - до 0,01; кремний - до 0,02; гафний - до 0,010.

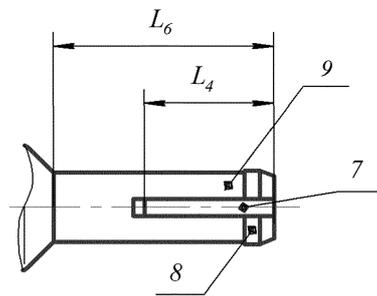
8. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что пружинный фиксатор выполнен из нержавеющей стали.

9. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что виток пружинного фиксатора, контактирующий с верхней топливной таблеткой, поджат до контакта и подшлифован, образуя плоскость контакта витка и топливной таблетки.

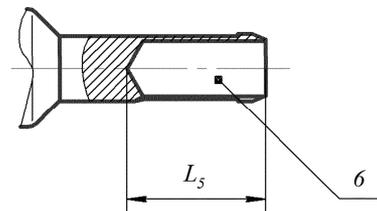
10. Тепловыделяющий элемент водо-водяного энергетического ядерного реактора по п.1, отличающийся тем, что в качестве инертного газа под оболочкой используют гелий с массовой долей в конечном изделии в диапазоне от 90 до 99%.



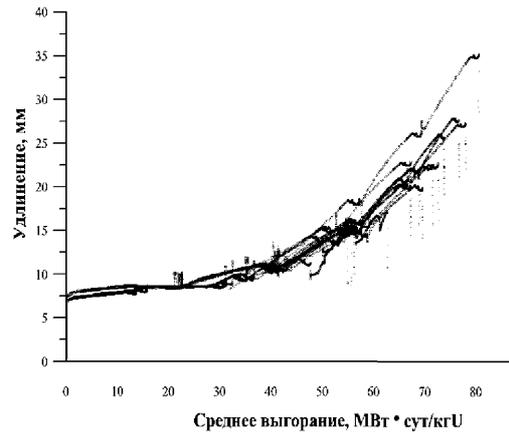
Фиг. 1



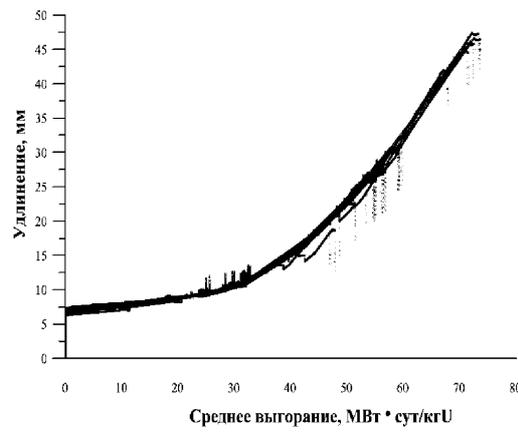
Фиг. 2



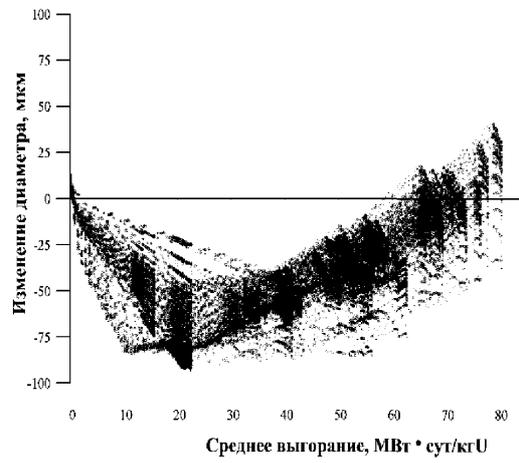
Фиг. 3



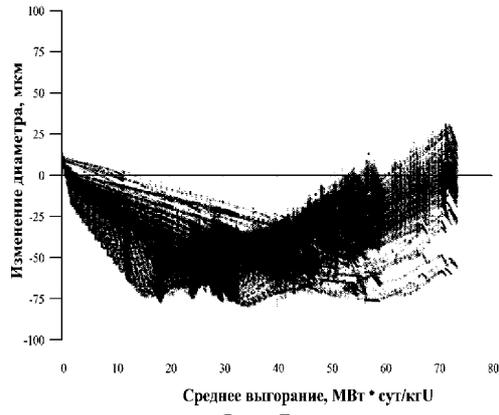
Фиг. 4



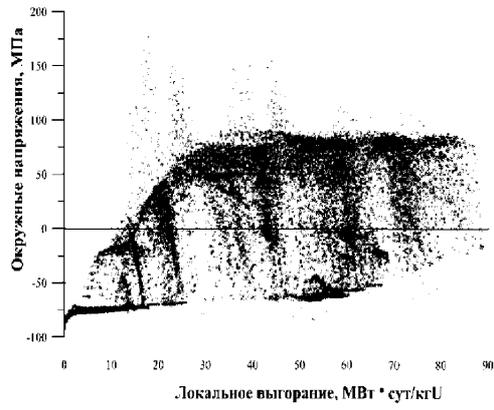
Фиг. 5



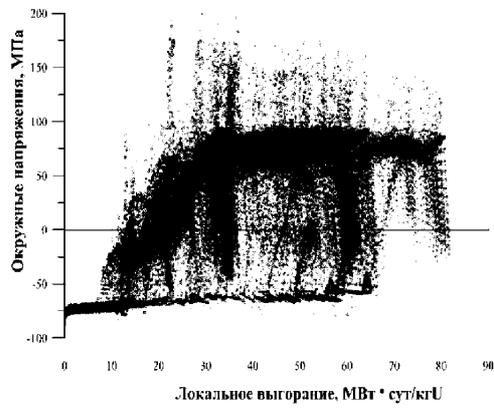
Фиг. 6



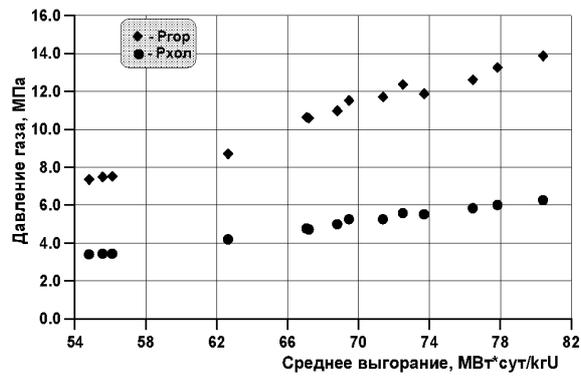
Фиг. 7



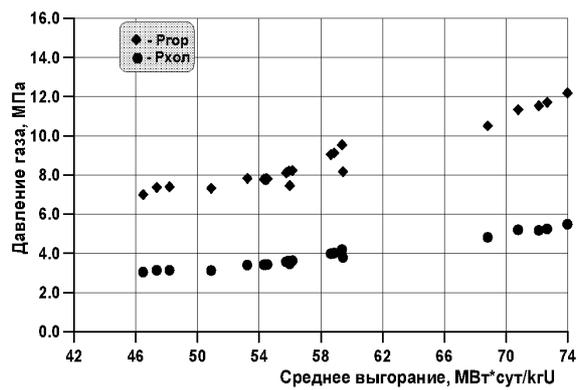
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11