

Винахід відноситься до ядерної техніки, зокрема до пристроїв системи управління і захисту (СУЗ) корпусних водоохолоджуваних ядерних реакторів і може бути використаний в регулюючих органах, виконаних в вигляді одиночних стрижнів з різним поперечним перетином або в вигляді зборок, що містять набір регулюючих (керуючих) стрижнів, або набір паливних і регулюючих стрижнів, призначених для компенсації надлишкової реактивності, регулювання реактивності в процесі роботи на потужності, і особливо в якості аварійних стрижнів, а також при використанні в керуючих системах із суміщеними функціями.

Нормальна і безпечна експлуатація ядерного реактора забезпечується підтриманням реактивності на необхідному рівні під час пуску, зупинки, перехідних процесів, а також різким зниженням реактивності при зупинці реактора. Для цього реактор оснащується регулюючими стрижнями різноманітного виконання, сполученими з приводом, що переміщує їх по висоті активної зони для зміни реактивності в необхідних межах.

Особливістю водоохолоджуваних ядерних реакторів є те, що, в зв'язку з достатньо чималим часом експлуатації ядерного палива без перезавантаження і високою енергонапруженістю, надлишкова реактивність в них, в розрахунку на вигорання палива, порівняно велика. Крім того, в таких реакторах значні температурний і потужносний ефекти. Все це, в кінцевому підсумку, призводить до того, що в активній зоні корпусного водоохолоджуваного реактора на початку компанії може міститися до декількох десятків критичних мас, для компенсації яких необхідна значна сумарна ефективність всіх органів СУЗ, що створює проблему розміщення механічної системи регулювання.

Запас реактивності на вигорання палива в сучасних водоохолоджуваних реакторах, зокрема на ВВЭР-1000, компенсується борною кислотою, розчиненою в теплоносії першого контуру, що поступово виводиться впродовж вигорання паливних завантажень. Робоча група органів регулювання (приблизно 10% від загальної кількості) при цьому знаходиться у напівзавантаженому стані. Інші органи регулювання (близько 90% від загальної кількості) виведені із зони і знаходяться у режимі аварійного захисту (АЗ). В цьому режимі роботи нижня частина поглинаючих елементів фактично знаходиться в зоні верхнього відбивача й інтенсивно вигорає. Означена специфіка використання поглинаючих елементів у водоохолоджуваних реакторах призводить до істотної нерівномірності вигорання поглиначів в органах регулювання по їхній довжині в залежності від положення відносно активної зони.

З цієї причини, при розробці та вдосконаленні поглинаючих елементів для даного типу реакторів велика увага приділяється вибору нейтронопоглинаючих матеріалів і композицій. Тим більш, що з плином часу при роботі реактора, частину органів регулювання підіймають з активної зони, змінюють функціональне призначення іншої частини органів регулювання, а органи регулювання, піднесені над активною зоною, можуть бути введені до неї з різних причин. Тому при конструюванні регулюючих стрижнів слід враховувати характеристики стрижнів при різних режимах експлуатації реактора, зокрема для забезпечення необхідного профілю поглинальної спроможності і при функціонуванні стрижня в режимі аварійного захисту.

Одержання необхідного профілю поглинальної спроможності по довжині стрижня реалізується різноманітними конструктивними рішеннями. Наприклад, за рахунок установки в нижній частині стрижня між таблетками з карбіду бору, таблеток з матеріалу, поглинаючого нейтрони в меншій мірі - двоокису цирконію (див. Патент США № 4624827, кл. G21C7/10, 1986 р.).

Необхідне зменшення поглинаючої спроможності в нижній частині стрижня можна забезпечити зменшенням діаметру таблеток зверху донизу з одночасним зменшенням концентрації поглинаючого матеріалу - карбіду бору (див. Заявка Франції № 2570214, кл. G21C7/10, 1986 р.).

Відомий також стрижень, що включає три секції, верхня з яких має найбільший перетин поглинання і виконана з карбіду бору, в нижній частині розміщений поглинач з меншим перетином поглинання, ніж в верхній секції, а між ними розміщена середня секція, матеріал якої практично не поглинає нейтрони (див. Патент США № 4062725, кл. G21C7/10, 1977 р.). В даній конструкції також реалізується задана поглинаюча спроможність по довжині стрижня.

Всі описані вище конструкції припускають застосування в якості частини стрижня карбіду бору або матеріалу, що включає бор-10, який є добрим поглиначем нейтронів, що є суттєвим при функціонуванні стрижня в режимі аварійного захисту. Проте, при поглинанні карбідом бору нейтронів по реакції (n, α) відбувається його розпушення і інтенсивне газовиділення, що знижує ресурс органів регулювання і вимагає конструктивних технологічних удосконалень стрижнів.

Розміщення в нижній частині стрижня, що вводиться в активну зону першої, сплаву срібла (Ag-In-Cd), що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ) дозволяє істотно знизити розпушення карбіду бору і газовиділення за рахунок екрануючого впливу на карбід бору шляхом виведення його з областей з високими потоками нейтронів при розміщенні стрижня під час експлуатації в верхній частині активної зони або на ній (див. Патент США № 4699756, кл. G21C7/10, 1985 р.).

Проте, під час кампанії реактора в процесі опромінення відбувається зміна ефективності поглинання нейтронів сплавом срібла, що призводить до зміни його екранізуючого впливу на карбід бору і, як наслідок, до зміни характеристик стрижня впродовж його експлуатації, зокрема до зміни сумарної фізичної ваги стрижня.

Причому, в залежності від флюенса ефективність поглинання нейтронів сплавом Ag-In-Cd змінюється за нелінійним законом, що практично виключає можливість точного розрахунку ефективності всього стрижня в цілому від часу перебування в різних ділянках активної зони і над нею. При цьому ускладнюється прогнозування терміну служби стрижнів, а також ускладнюється створення систем переміщення стрижнів (пристроїв контролю, приводів та ін.), бо має місце непередбачуване нерівномірне вигорання двох частин стрижня.

Найбільш близьким до того, що описується, щодо технічної сутності, є регулюючий стрижень корпусного водоохолоджуваного ядерного реактора, що містить оболонку, всередині якої розміщений стовп поглинач нейтронів, виконаний по довжині L з двох частин, одна з яких включає матеріал, що вступає в реакцію з нейтронами (n, α), а друга, що всовується в активну зону першої, включає матеріал на основі диспрозію (див. В.М. Чернышев, В.И. Ряховских и др., "Усовершенствованные поглощающие стержни реактора ВВЭР-1000". Доклад на семинаре "VVER Fuel Reliability and Flexibility". Чехия, г. Ржеж, 17-22 июня 1996 г.).

Вибір в якості матеріалу, що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ), сполук диспрозію ($Dy_2O_3 \times TiO_2$, $Dy_2O_3 \times TiO_7$, $Dy_2O_3 \times HfO_2$), призводить до стабілізації параметрів стрижня, оскільки дані сполуки диспрозію, по-перше, незначно змінюють ефективність поглинання нейтронів в процесі опромінення, а, по-друге, закон зміни ефективності поглинання нейтронів має яскраво виражений лінійний характер. Достатньо надійне екранування карбиду бору від розпушення забезпечується при довжині частини, займаної матеріалом на основі диспрозію, не менш 2% від всієї довжини стовпа поглинача нейтронів.

Крім того, наявність в частині стовпа матеріалу на основі диспрозію значно підвищує сумарну масу стрижня, оскільки густина диспрозію більш, ніж у чотири рази вище густини карбиду бору. Збільшення маси стрижня підвищує швидкість введення стрижня до активної зони в режимі АЗ при його вільному падінні, що спричиняє позитивний вплив на безпеку реактора.

Однак, значна довжина частини стовпа поглинача нейтронів, що її займає матеріал на основі диспрозію, яка складає у відомому пристрої понад 20% від загальної довжини стовпа, знижує ефективність стрижня в цілому, бо суттєво зменшується кількість карбиду бору, що характеризується більшою у порівнянні з диспрозієм поглинальною спроможністю, і це виявляє негативний вплив на характеристики органу регулювання.

В основу даного винаходу покладене розв'язання задачі по опрацюванню та створенню органу регулювання, що має підвищену фізичну масу при одночасному забезпеченні достатньої ефективності (поглинальної спроможності).

Технічним результатом цього винаходу є збільшення швидкості падіння органу регулювання в режимі аварійного захисту при необхідних нейтронопоглиначних характеристиках.

Поставлене завдання вирішується тим, що в регулюючому стрижні корпусного водоохолоджуваного ядерного реактора, що містить оболонку, всередині якої розміщений стовп поглинача нейтронів, виконаний по довжині L з двох частин, одна з яких включає матеріал, що вступає в реакцію з нейтронами (n, α), а друга, що всовується в активну зону першої, включає матеріал на основі диспрозію, довжина l частини стовпа поглинача нейтронів з матеріалу на основі диспрозію визначається з виразу:

$$\frac{l}{L} \leq \left(\frac{l}{L} \right)_{\max} = \left(\frac{l}{L} \right)_0 \left(1 + \frac{E_{\text{дод}}}{E_0} \right),$$

де $\left(\frac{l}{L} \right)_{\max}$ - максимально можливе значення величини відношення l до L , що забезпечує необхідну ефективність;

$\left(\frac{l}{L} \right)_0$ - розрахункова величина, при якій ефективність органу регулювання дорівнює мінімально необхідній ефективності (E_0) однорідного по довжині стрижня довжиною L , повністю заповненого поглиначем, що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ);

$E_{\text{дод}}$ - додаткова ефективність для забезпечення мінімально необхідної сумарної ефективності по довжині органу регулювання при збільшенні довжини поглинача, що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ).

Крім того, що як матеріал, що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ), використаний карбід бору, а в якості матеріалу, що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ), використаний монотитанат диспрозію ($Dy_2O_3 \times TiO_2$) і/або дититанат диспрозію ($Dy_2O_3 \times TiO_7$), і/або гафнат диспрозію ($Dy_2O_3 \times HfO_2$).

Карбід бору і матеріал на основі диспрозію можуть бути застосовані в вигляді порошку і/або в вигляді таблеток.

При застосуванні карбиду бору в вигляді порошку доцільно вибирати розмір зерен від 5 мкм до 160 мкм, а порошок віброущільнювати до густини не менш 1,7 г/см³.

При використанні матеріалу на основі диспрозію в вигляді порошку, розмір зерен обраний від 5 мкм до 315 мкм, а густина монотитанату диспрозію або дититанату диспрозію після віброущільнення складає від 4,9 г/см³ до 7 г/см³. Порошок гафнату диспрозію віброущільнюють до густини 7 г/см³ або 9 г/см³.

Відзначальною особливістю даного винаходу є вибір довжини l частини стовпа поглинача нейтронів з матеріалу на основі диспрозію за певним співвідношенням, що обмежене максимально можливим значенням величини сумарної маси складеного стрижня, і враховує необхідну ефективність (поглинальну спроможність) стрижня. Збільшення довжини l частини стовпа поглинача нейтронів з матеріалу на основі диспрозію, що призводить до зростання сумарної маси стрижня, а отже і до підвищення швидкості його введення (падіння) в активну зону, є можливим лише до такого значення, при якому відношення l до L не перевищує максимального (порогового) значення. Максимальне значення відношення l до L , з одного боку обмежене розрахунковою величиною відношення l до L , при якій ефективність органу регулювання дорівнює мі-

німально необхідній ефективності (E_0) однорідного по довжині стрижня довжиною L , повністю заповненого поглиначем, що вступає в реакцію з нейтронами (n, α), а з іншого боку припускає можливість збільшення за рахунок створення додаткової ефективності ($E_{\text{дод}}$) для забезпечення мінімально необхідної сумарної ефективності по довжині органу регулювання при збільшенні довжини поглинача, що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ). Внесення додаткової ефективності може бути здійснене, наприклад, збільшенням загального числа органів регулювання, за рахунок підвищення поглинаючої спроможності частин стрижня, а також будь-якими відомими засобами.

Означені переваги, а також особливості даного винаходу роз'яснюються при наступному розгляді найкращого варіанту реалізації винаходу.

На фіг. 1 зображено загальний вид регулюючого стрижня корпусного водоохолоджуваного ядерного реактора, на фіг. 2 показаний варіант виконання регулюючого стрижня, в якому матеріал (карбід бору), що вступає в реакцію з нейтронами (n, α), застосований в вигляді таблеток, а матеріал на основі диспрозію використаний в вигляді віброуцільненого порошку, на фіг. 3 наведено варіант конструкції, в який матеріал, що вступає в реакцію з нейтронами (n, α), застосований в вигляді віброуцільненого порошку, а матеріал на основі диспрозію виконаний в вигляді таблеток, на фіг. 4 представлено варіант, що передбачає виконання всього стовпа поглинача нейтронів з різноманітних матеріалів в вигляді таблеток.

Регулюючий стрижень 1 ядерного реактора складається з оболонки 2, всередині якої розміщений стовп 3 поглинача нейтронів довжиною L . Одна частина 4 стовпа 3 включає матеріал, що вступає в реакцію з нейтронами (n, α), наприклад, карбід бору. Друга частина 5, що вводиться в активну зону (на фігурі не показана) першої, довжина якої l , містить матеріал, в якості якого використана сполука на основі диспрозію, що вступає в реакцію з нейтронами (n, γ). Висота l частини 5 складає не менш 2% від висоти L стовпа 3. Оболонка загерметизована, наприклад, зварюванням, за допомогою нижньої 6 і верхньої 7 кінцевих деталей.

Між верхньою кінцевою деталлю 7 і стовпом 3 може бути передбачена порожнина 8 для збирання газів, а також для розміщення в ній фіксаторів 9 стовпа 3. В зв'язку з тим, що при опроміненні нейтронами частини 4 стовпа 3, процес газовиділення з карбід бору незначний із-за наявності частини 5, займаною диспрозієм, в порожнину 8 може бути поміщений обважнювач 10 маси стрижня. Частини 4 і 5 стовпа 3 можуть бути заповнені віброуцільненим порошком 11 з відповідних матеріалів або набрані з таблеток 12.

Регулюючий орган функціонує в такий спосіб. В залежності від умов експлуатації і необхідного підтримання рівня потужності, стрижень 1 може бути розміщений в різноманітних положеннях відносно активної зони. При розташуванні стрижня над активною зоною або при частковому введенні його в активну зону, частина 4 стовпа поглинача нейтронів не має значної нерівномірності вигорання і мало піддається негативному впливу нейтронів, який полягає в її розпушенні і газовиділенні з неї, що забезпечує наявністю частини 5, яка містить диспрозій.

В випадку надходження сигналу аварійного захисту стрижень 1 повністю вводиться при вільному падінні в активну зону, чому сприяє обважнювач 10. Проте збільшення маси стрижня за рахунок наявності обважнювача 10 обмежене габаритами простору для його розміщення. Подальше збільшення маси стрижня можливо за рахунок підвищення значення довжини l , частини 5 стрижня, заповненої матеріалом на основі диспрозію, що має густину вище, ніж густина карбід бору. Підвищення довжини l і, відповідно, відношення l до L , призводить до збільшення сумарної маси стрижня, а, отже, і до зростання швидкості падіння стрижня в активну зону. Але максимальне значення довжини l обмежене величиною сумарної ефективності стрижня. Тому подальше зростання величини l , що знижує сумарну ефективність стрижня, повинно бути скомпенсоване засобами, що підвищують ефективність складеного стрижня з позицій використання його в складі органів регулювання ядерного реактора. Таким чином, при заданій швидкості падіння стрижня, що зумовлена заданим часом введення стрижня до активної зони, при проектуванні і створенні нового стрижня слід враховувати зміну його ефективності (поглинальної спроможності), що може бути скомпенсована кількістю стрижнів, їхнім діаметром і іншими відомими засобами. В будь-якому випадку, регулюючий стрижень корпусного ядерного реактора, що складається з двох частин, одна з яких, що вводиться в активну зону першої, виконана з матеріалу на основі диспрозію, а друга - з карбід бору, не повинен мати довжину l частини 5, при якій відношення l до L перевищує максимально можливе значення цього параметру, що визначається з виразу.

Конструктивно елементи стрижня можуть бути виконані будь-яким відомим чином. Стрижень може використовуватися автономно і мати індивідуальний привід переміщення. Набір стрижнів може бути поєднаний в зборку (кластер) із спільним приводом. Стрижні можуть бути встановлені в тепловиділяючу зборку (кластер) замість твєлів. Використання стрижнів по-різному здійснюється також відомими шляхами.

Промислова придатність регулюючого стрижня корпусного водоохолоджуваного ядерного реактора описується при виконанні, зокрема шляхом введення у активну зону регулюючого стрижня (І.Я. Емельянов и др., Конструирование ядерных реакторов, М., Энергоиздат, 1982, с. 194-198) [1].

Конструктивні форми регулюючих органів, зокрема регулюючих стрижнів, можуть бути різноманітними. Як правило, це несуча конструкція (оболонка), всередині якої розміщений матеріал, що поглинає нейтрони (В.Б. Пономаренко и др., Органы регулирования и СВП ядерных реакторов ВВЭР-1000 и пути их усовершенствования, "Вопросы атомной науки и техники". Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1994, выпуск 2(62), 3(63), с. 96, Национальный научный центр "Харьковский научно-технический институт") [2].

Стовп поглинача нейтронів може бути виконаний складеним, причому частина стовпа, яку вводять у активну зону першої, тобто нижньої частини, містить матеріал на базі диспрозію, а друга, тобто верхня, частина містить матеріал, що має з нейтронами (n, α) реакцію (див. 2, с. 106). В якості матеріа-

ла, що має з нейтронами (n , α) реакцію може бути використаний карбід бору (B_4C), що має, як широко відомо, власне зазначену реакцію при взаємодії з нейтронами. Технологія виробництва таких регулюючих стрижнів достатньо відпрацьована та не викликає великих труднощів.

Суть заявленого винаходу полягає у виборі співвідношення між усією довжиною L стовпа поглинач нейтронів та довжиною l частини стовпа поглинач нейтронів, що виконана із матеріала на базі диспрозійу.

Очевидно, що довжина l стовпа нейтронів визначена із габаритів активної зони та має фіксоване значення, наприклад 3700 мм (див. 2, с. 106). У такому випадку значення величин l повинно задовольняти наведеному у формулі винаходу розрахунковому виразу та може бути визначено нескладним нейтронно-фізичним розрахунком. Дійсно, загальна ефективність регулюючого стрижня однозначно залежить від мікроскопічних перерізів "а" поглинання теплових нейтронів різних поглинаючих матеріалів, що входять до складу стовпа поглинач нейтронів (див. 1, с. 195). Природньо, що чим більша величина "а", тим вища ефективність стрижня. Винахід, що розглядається, припускає, що співвідношення l/L не повинно перевищувати деякого максимально можливого значення даного співвідношення l/L_{\max} . Якщо вказана умова не виконується, необхідно змінити значення величин l . При цьому масштаб зміни величини l залежить від абсолютних значень величини поглинання вибраних матеріалів, що складають стовп поглинач.

Підбір матеріалів, що входять до складу стовпа поглинач нейтронів здійснюють, виходячи з їх відомих якостей, зокрема з тих, що є в літературних джерелах (див. 1, с. 196-198).

Таким чином, з урахуванням раніше відомих знань, запропонований винахід є доступним середньому фахівцю в галузі ядерного машинобудування та може бути здійснений із застосуванням відомих засобів.

Описаний стрижень корпусного водоохолоджуваного ядерного реактора має підвищену стабільність параметрів за рахунок комбінації поглинаючих елементів при максимально можливій масі, що позитивно відбивається при впливі на реактивність реактора, і може знайти застосування в діючих ядерних реакторах, а також у знов створюваних конструкціях. При цьому врахована зміна поглинаючої спроможності стрижня в цілому за рахунок підвищення питомого вмісту матеріалу на основі диспрозійу в загальній довжині стовпа поглинач нейтронів.

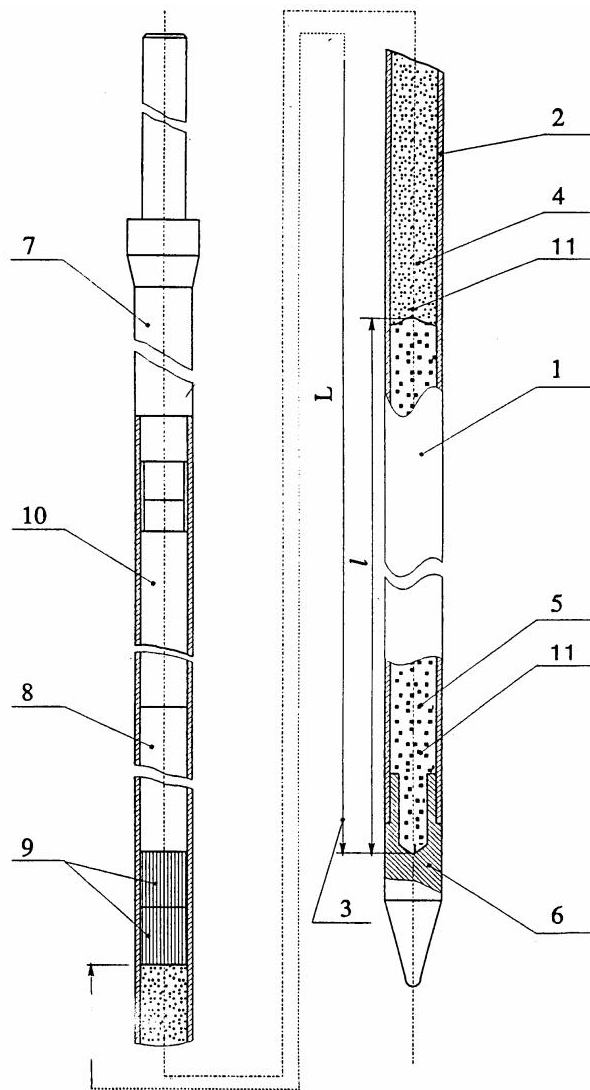
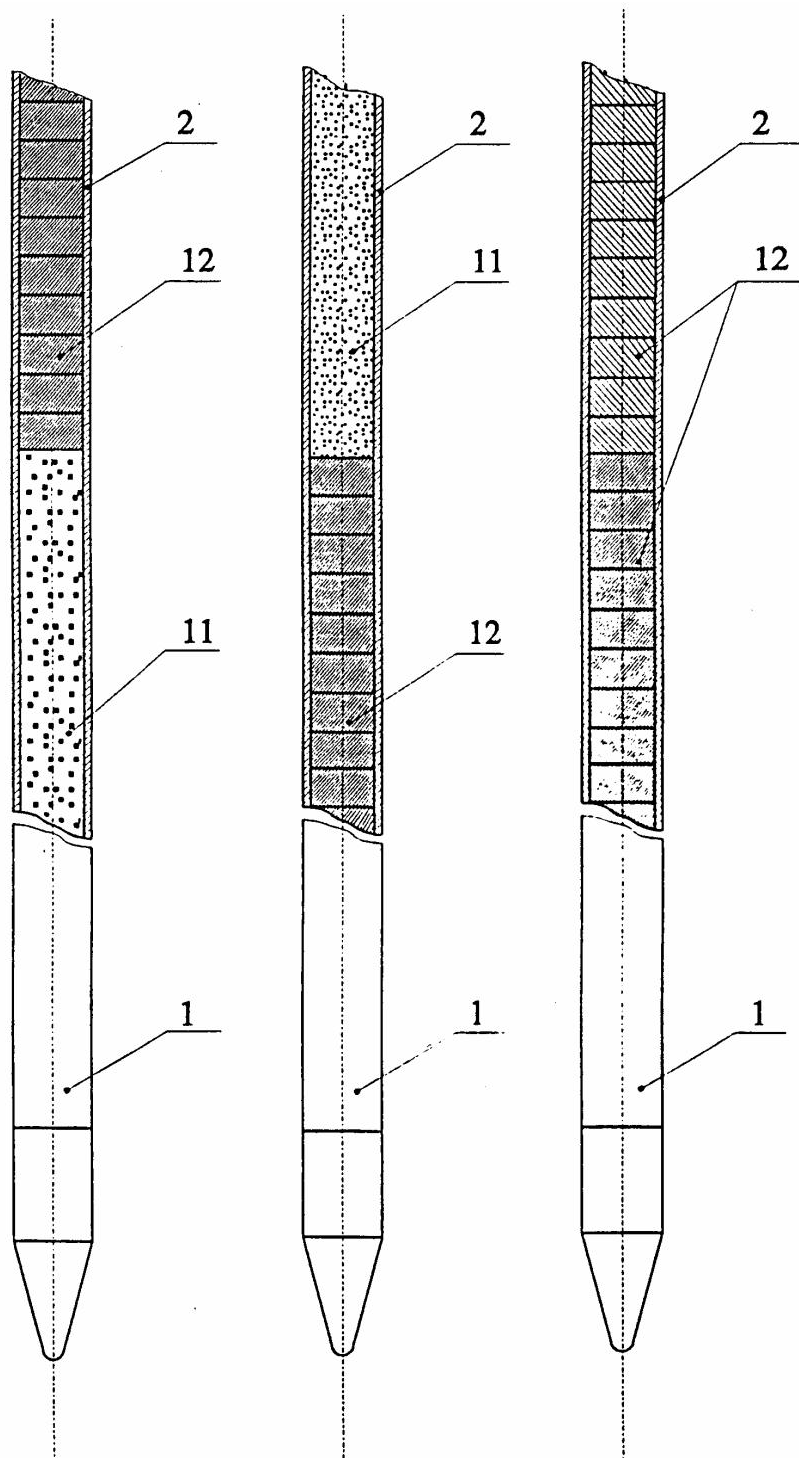


Fig. 1



Фіг. 2

Фіг. 4

Фіг. 3

Тираж 50 екз.

Відкрите акціонерне товариство «Патент»
 Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101
 (03122) 3 – 72 – 89 (03122) 2 – 57 – 03